DE L'INDUCTION

ET

DES APPAREILS ÉLECTRO-MÉDICAUX

PAR

F. P. LE ROUX,

DOCTEUR ÈS SCIENCES, PHARMACIEN DE 1re CLASSE, RÉPÉTITEUR DE PHYSIQUE A L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
PROFESSEUR DE GÉOMÉTRIE A L'ÉCOLE DU CONSERVATOIRE DES ARTS ET MÉTIERS,
MEMBRE DE LA SOCIÉTÉ PHILOMATHIQUE ET DU CONSEIL DE LA SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT
POUR L'INDUSTRIE NATIONALE.

Thèse présentée à l'École supérieure de Pharmacie pour l'agrégation des sciences physiques.

PARIS

CHEZ J. B. BAILLIÈRE ET FILS, LIBRAIRES-ÉDITEURS,
RUE HAUTEFEUILLE, 19.

1869

à Monsieur Decaisne
membre de l'Institut, etc.
hommage de l'auteur

DE L'INDUCTION

ET

DES APPAREILS ÉLECTRO-MÉDICAUX

PAR

F. P. LE ROUX,

DOCTEUR ÈS SCIENCES, PHARMACIEN DE 1re CLASSE, RÉPÉTITEUR DE PHYSIQUE A L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
PROFESSEUR DE GÉOMÉTRIE A L'ÉCOLE DU CONSERVATOIRE DES ARTS ET MÉTIERS,
MEMBRE DE LA SOCIÉTÉ PHILOMATHIQUE ET DU CONSEIL DE LA SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT
POUR L'INDUSTRIE NATIONALE.

Thèse présentée à l'École supérieure de Pharmacie pour l'agrégation des sciences physiques.

PARIS
CHEZ J. B. BAILLIÈRE ET FILS, LIBRAIRES-ÉDITEURS,
RUE HAUTEFEUILLE, 19.

1869

JUGES DU CONCOURS.

MM. BRONGNIART, Membre de l'Institut, Inspecteur général de l'enseignement supérieur, Professeur au Muséum, *Président.*

BUSSY, Membre de l'Institut, Directeur de l'École supérieure de Pharmacie.

REGNAULD, Professeur à la Faculté de Médecine.

CHATIN, Professeur à l'École de Pharmacie.

BERTHELOT, Professeur au Collége de France et à l'École de Pharmacie.

BUIGNET, Professeur à l'École de Pharmacie.

MILNE-EDWARDS, *Id.*

CANDIDATS.

MM. BOURGOIN, FRÉMINEAU, JUNGFLEISCH, LE ROUX, MARCHAND.

DE L'INDUCTION

ET

DES APPAREILS ÉLECTRO-MÉDICAUX



I.

DE L'INDUCTION.

Les phénomènes dont se compose cette branche de nos connaissances en électricité seront envisagés ici en tant que faits, indépendamment de toute hypothèse sur le mécanisme intérieur qui peut leur donner naissance; nous chercherons à les grouper le plus méthodiquement possible, et à mettre en évidence celles de leurs lois qui sont connues et les conséquences qu'on en peut tirer, sans nous préoccuper des procédés qui ont pu être employés pour les découvrir ou les démontrer, nous efforçant surtout de rendre facilement accessibles les principes fondamentaux qui président à la construction et à l'étude des appareils qui font l'objet de la seconde partie de ce travail.

1. — Notre illustre Ampère découvrit que deux conducteurs parallèles parcourus chacun par un flux d'électricité s'attiraient lorsque le sens de ces flux électriques ou *courants* (1) était le même dans chacun d'eux, se repoussaient lorsque le sens était différent.

On peut formuler ce fait d'une manière générale en disant : « l'existence du cou-

(1) Nous rappellerons que dans l'hypothèse des deux fluides électriques on suppose que l'électricité positive se meut plus vite que la négative, et qu'alors, lorsqu'on met en communication les deux pôles d'un couple, il y a mouvement de l'électricité du pôle qui manifeste une tension d'électricité positive vers celui qui manifeste une tension d'électricité négative : par exemple, que dans un couple zinc eau acidulée et cuivre, le courant marche du cuivre au zinc dans le fil conjonctif. Le mot *courant* se comprend plus simplement dans l'hypothèse de l'existence d'un seul fluide, dont l'excès donnerait lieu aux phénomènes que nous attribuons à une électricité positive et le défaut à ceux de l'électricité dite négative.

« rant électrique dans deux conducteurs tend à leur faire prendre un certain état de « mouvement relatif. »

Mais la réciproque est-elle vraie? à savoir : un certain état de mouvement relatif de deux conducteurs, dont l'un seulement est parcouru par un courant électrique, peut-il faire naître un courant dans le second? Faraday a eu la gloire de se poser la question et de la résoudre par l'affirmative.

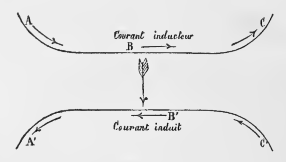


Fig. 1.

Un circuit ABC est parcouru par un courant électrique dont le sens est indiqué par les flèches; un autre circuit A′B′C′, dans lequel ne préexiste aucun courant, est placé à une certaine distance du premier; Faraday a constaté que, si on vient à faire diminuer cette distance, il naît dans ce second circuit, pendant tout le temps que dure le mouvement, un courant de sens contraire à celui qui existe dans ABC; si le mouvement, au lieu de rapprocher les deux circuits l'un de l'autre, a pour effet de les éloigner, le courant qui se développe dans A′B′C′ est de même sens que celui qui préexiste dans ABC.

Faraday a donné à la cause inconnue de ce phénomène le nom d'*induction;* le courant préexistant s'appelle *courant inducteur;* celui qui prend naissance par le mouvement, *courant induit* (1).

2. — M. Lenz a relié, d'une manière très-heureuse, le phénomène de l'induction

---

(1) Il est à remarquer qu'Ampère avait approché de la découverte de l'induction. (Voyez *Résumé de l'histoire de l'électricité et du magnétisme*, par Becquerel et Edm. Becquerel; Paris, 1858, page 83.) Il avait même annoncé l'existence d'un courant induit dans un cas où il était assez difficile de l'observer : il avait en effet annoncé que « il s'établit dans un conducteur « mobile formant une circonférence complétement fermée, un courant électrique par l'influence « de celui qu'on produit dans un conducteur fixe circulaire et redoublé, placé très-près du con- « ducteur mobile, mais sans communication avec lui. » La fausse direction donnée par Ampère à ses tentatives tenait évidemment à ce qu'il avait négligé de considérer l'état de mouvement des circuits comme une des conditions essentielles de la question.

aux actions électro-dynamiques, en remarquant que *le sens du courant induit est contraire à ce qu'il devrait être pour produire un mouvement relatif des deux circuits de même sens que celui qui détermine l'induction.*

Cette loi est fondamentale : elle s'applique à tous les cas possibles de l'induction, dont il va être question ci-après; elle permet de ramener, en ce qui concerne le *sens* des phénomènes, un grand nombre de problèmes d'induction à des problèmes d'électro-dynamique.

3. — Le courant induit est beaucoup plus faible que le courant inducteur; il est proportionnel, toutes choses égales d'ailleurs, aux longueurs des deux circuits mises en présence; aussi, pour faire commodément l'expérience fondamentale dont nous venons de parler, a-t-on soin de placer deux conducteurs repliés en zigzag sur deux planchettes que l'on rapproche l'une de l'autre aussi rapidement que possible.

Cette dernière condition est essentielle, car on doit regarder l'intensité du courant induit comme proportionnelle à la vitesse du mouvement de rapprochement ou d'éloignement des deux circuits.

4. — Ce n'est pas seulement la variation de la distance qui existe entre les deux circuits ABC et A′B′C′ qui peut faire naître, dans ce dernier, un courant induit; la distance restant la même, un effet du même genre se produira si on vient à faire varier l'intensité du courant qui circule dans ABC.

Le courant induit est de même sens que le courant inducteur quand celui-ci décroît; il est de sens inverse quand il diminue. Ainsi, comme on devait d'ailleurs s'y attendre, l'accroissement du courant inducteur produit le même effet que le rapprochement des circuits, son décroissement le même effet que leur éloignement.

Il est presque inutile d'ajouter que dans ce cas-ci les effets d'induction sont d'autant plus marqués que la distance des deux circuits est moindre.

5. — L'intensité du courant induit peut être regardée comme proportionnelle à la vitesse de variation du courant inducteur. Si celle-ci était constante, l'intensité du courant induit le serait elle-même; mais cette circonstance doit être considérée comme un cas exceptionnel.

L'intensité I du courant inducteur étant une fonction du temps $F(t)$, l'intensité i du courant induit sera, d'après ce qui vient d'être dit

$$i = -N\frac{dI}{dt} = -NF'(t)$$

ou, en langage ordinaire : l'intensité du courant induit est représentée par la dérivée, prise en signe contraire, de la fonction du temps qui exprime la loi de succession des valeurs de l'intensité du courant induit, N étant un certain coefficient dépendant des circonstances qui caractérisent la position du circuit induit par rapport à l'inducteur, sa résistance, etc.

Nous allons examiner l'interprétation géométrique de ce principe.

Si une courbe telle que P Q R représentait la loi des intensités du courant inducteur, les temps étant comptés sur l'axe O T, et les intensités sur des ordonnées parallèles à

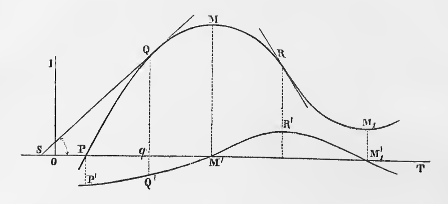


Fig. 2.

l'axe O I, l'intensité du courant induit serait proportionnelle à la tangente trigonométrique de l'angle Q S q que fait avec l'axe des temps la tangente à cette courbe menée au point Q.

Dans notre exemple, cet angle va en diminuant de P en M, M étant la position d'un maximum ; à ce point la tangente à la courbe fait un angle nul avec l'axe des temps. Comme la tangente varie dans le même sens que l'angle, on voit que la courbe représentative de l'intensité du courant induit sera un arc tel que P′ Q′ M′, autrement dit que l'intensité de l'induit passera par zéro au moment où l'inducteur passera par un maximum, pour croître ensuite positivement pendant le décroissement de celui-ci.

Si à un certain moment, en R par exemple, la courbe représentative de l'inducteur présente un point d'inflexion, comme l'angle de la tangente avec l'axe des temps qui, jusqu'en ce point avait été en croissant, va ensuite en décroissant, il en résulte que l'intensité de l'induit passe en ce point par un maximum. Elle redevient zéro lorsque l'intensité de l'inducteur passe par un minimum M_1, et ainsi de suite.

Ces considérations peuvent servir à rendre compte de la marche du courant induit dans toutes les circonstances où il prend naissance, précédemment examinées ou qui le seront ci-après. Il suffit de remplacer la courbe qui, dans l'exemple ci-dessus, représentait la loi de la variation de l'inducteur par celle de la variation de la cause inductrice, quelle qu'elle soit, distance, aimantation, etc.

Il est intéressant de remarquer qu'au point de vue du courant induit une augmentation de courant positif et une diminution de courant négatif produisent un effet identique ; cette remarque est favorable à l'opinion des physiciens qui ne conçoivent dans les deux électricités qu'une question de plus et de moins d'un même agent.

6.— Pour en revenir à l'induction produite par un courant variable, si l'intensité de l'induit croît avec la vitesse de variation de l'inducteur, les induits les plus intenses que nous pourrons réaliser avec un courant d'intensité maximum donnée seront évidemment ceux qui résultent de l'établissement ou de la cessation de ce courant, car ces deux phénomènes s'accomplissent dans un temps excessivement court, et l'amplitude de la variation totale sera pendant ce temps aussi grande que possible, puisqu'elle ira de zéro à l'intensité donnée de l'inducteur, et réciproquement.

L'expérience se fait commodément en enroulant sur une bobine deux fils juxtaposés isolés l'un de l'autre : le circuit de l'un, qui est l'induit, est fermé par un galvanomètre ; le circuit de l'autre par une pile. Le galvanomètre fait reconnaître l'existence des induits : le premier induit, qui est inverse, est l'induit de *fermeture* ou d'*établissement;* le second, qui est *direct* c'est-à-dire de même sens que l'inducteur, est l'induit de *rupture* ou de *cessation*.

On reconnaît que l'intensité moyenne de l'induit de rupture est plus grande que celle de celui d'établissement ; mais comme on peut s'assurer aussi par des phénomènes électro-chimiques que la même quantité d'électricité est mise en jeu dans chacun d'eux, on en conclut que le phénomène de la cessation d'un courant s'accomplit dans un temps plus court que celui de son établissement dans un même circuit.

7. — Avant d'entrer plus loin dans l'étude de l'induction, nous devons faire disparaître une restriction apparente. Nous avons supposé jusqu'ici que les deux circuits, inducteur et induit, étaient parallèles, et qu'ils conservaient cette position pendant leur mouvement relatif. Mais cette condition n'est qu'un cas particulier.

D'une manière générale, on peut dire que chaque portion, aussi petite qu'on peut la concevoir, chaque *élément,* comme on dit, du courant inducteur, agit sur chaque élément du circuit induit ; de telle sorte que l'effet définitif est la somme des actions de tous les éléments du premier sur tous les éléments du second. Or, nous avons dit que l'ensemble des phénomènes de l'induction avait conduit à regarder celle-ci comme une sorte de réciproque des effets électro-dynamiques. Ceux-ci dépendent de deux actions élémentaires distinctes : l'une s'exerçant entre des éléments de courants parallèles entre eux et perpendiculaires à la droite qui les joint, position que j'appellerai première ; l'autre entre des éléments de courant dirigés suivant une même droite, ce sera la deuxième position. D'un autre côté, des expériences convenablement dirigées ont fait reconnaître à Ampère que l'action d'un élément de courant pouvait toujours être remplacée par celle de trois autres éléments de même intensité et égaux aux projections de celui-ci sur trois droites rectangulaires issues de l'une de ses extrémités.

D'après cela, l'action électro-dynamique de deux éléments de courant, dont la position relative est quelconque peut se ramener à celle de deux couples d'éléments, convenablement orientés et de longueurs géométriquement déterminées : l'un de ces couples étant de première position, et l'autre de deuxième.

Dans toutes les expériences, ces deux sortes d'actions s'entre-mêlent, et il n'y a pas de cas où il soit possible de mettre en évidence, d'une manière spéciale, l'induction d'éléments placés exclusivement dans l'une ou l'autre de ces positions.

8. — On pourrait croire que dans l'expérience de deux circuits parallèles, dont l'un est parcouru par un courant qui s'établit ou qui cesse, on serait en droit d'assimiler le courant qui varie d'intensité à une suite d'éléments s'avançant successivement dans la direction du fil induit. Cependant cette assimilation ne serait pas exacte, car le sens que l'on pourrait prévoir pour le courant induit, en appliquant la loi de Lenz au cas d'un élément de courant qui s'avancerait dans la direction d'un autre, n'est pas le même que celui dont l'expérience nous révèle l'existence dans le cas de deux circuits parallèles dont l'un est parcouru par un courant variable d'intensité.

Il semble qu'il faille plutôt assimiler l'induction par un courant qui s'établit ou qui cesse au transport presque instantané d'un circuit inducteur venant de l'infini, jusqu'à proximité du circuit induit ou réciproquement; et l'induction par un courant variable au rapprochement successif de circuits parcourus par des courants égaux aux accroissements successifs de ce courant variable pendant les éléments du temps.

On peut en effet concevoir que l'induction prenne naissance simplement parce que deux corps, dont l'un est parcouru par un courant électrique et dont l'autre ne l'est pas, doivent être entre eux dans une certaine relation électrique dépendant de la distance, d'après laquelle le conducteur influencé devrait différer de l'état naturel par une certaine quantité d'électricité en plus ou moins, dont le mouvement d'entrée ou de sortie serait précisément la cause du courant induit. Ce n'est pas ici le lieu de développer cette conception due à Faraday, mais elle se trouve corroborée par les deux conclusions que voici, faciles à tirer des lois généralement admises du développement des courants induits, et qui, je crois, se trouvent énoncées ici pour la première fois : 1° la quantité d'électricité induite par un changement donné de position relative de deux circuits est indépendante du temps employé à effectuer ce changement; 2° la quantité d'électricité induite dans un circuit donné par un courant subissant une variation donnée d'intensité est indépendante du temps employé à effectuer cette variation.

9. — Ces conclusions sont d'ailleurs d'accord avec un principe général que M. Felici a énoncé *à priori,* et qu'il a cherché à vérifier par l'expérience, à savoir : « la somme « de tous les courants induits dans un circuit conducteur par un circuit voltaïque « fermé et en mouvement, pendant le passage de ce dernier, d'une position dans la- « quelle il ne saurait produire, soit en s'ouvrant, soit en se fermant, aucun courant « induit dans le premier circuit, à une autre position quelconque, est égal au courant « que l'on peut produire en ouvrant ou fermant le même circuit inducteur placé « exactement dans la même position. »

10. — Nous venons d'exposer les principes fondamentaux de l'induction, ce sont ceux auxquels se ramènent tous les autres cas que nous allons examiner dans l'ordre suivant :

Courants induits de divers ordres ;
Induction d'un courant sur son propre circuit ;
Induction par les aimants.

Courants induits de divers ordres. — D'après ce qui précède, nous voyons qu'un courant d'induction est un courant éminemment variable, car il est toujours produit par la variation d'une certaine cause : pour qu'il fût constant, il faudrait que la vitesse de cette variation fût constante, ce qui ne saurait avoir lieu que pendant des temps très-courts, car la cause en question ne peut pas dépasser certaines limites, et doit même atteindre celles-ci dans un temps assez limité (généralement une petite fraction de seconde), pour que les phénomènes soient sensibles dans les conditions où il nous est permis de les réaliser.

Cet état variable inhérent à l'existence même d'un courant induit le rend éminemment propre à influencer un circuit voisin, de manière à y faire naître un autre courant induit qui est appelé *induit de second ordre*, le courant qui lui donne naissance étant l'induit de *premier ordre*.

Cet induit du second ordre peut de même induire dans un troisième circuit un courant qui est l'*induit du troisième ordre,* et ainsi de suite.

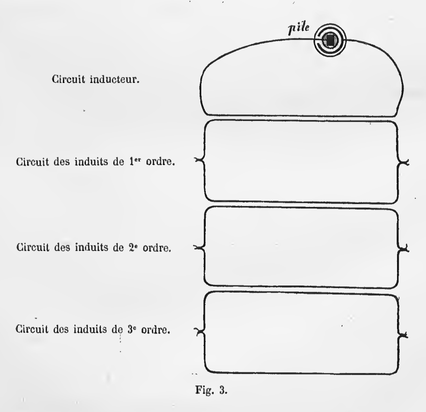


Fig. 3.

Nous supposerons quatre circuits juxtaposés consécutivement par leurs parties rec-

2

tilignes, comme l'indique la fig. 3, mais isolés les uns des autres , le courant d'une pile lancé dans le premier sera le courant inducteur.

11. — Pour que les courants induits d'un ordre élevé soient sensibles, il faut que la cause inductrice soit aussi puissante que possible, tant par son intensité propre que par la rapidité avec laquelle elle accomplit son évolution. Aussi emploie-t-on, de préférence, pour manifester les courants induits d'ordres supérieurs au premier, l'établissement et la rupture d'un courant aussi intense que possible. Ce courant peut être la décharge d'un condensateur; c'est là, en effet, un flux d'électricité dont la force électro-motrice est très-grande relativement à celle de nos piles, et qui ne dure d'ailleurs qu'un temps très-court, la décharge d'un condensateur pouvant être regardée comme généralement comprise entre un et deux cent-millièmes de seconde.

Nous raisonnerons sur le cas où l'inducteur est un courant intermittent pour mettre en évidence les particularités remarquables que présentent les courants induits des divers ordres, relativement à leur sens et à leur intensité.

12. — Commençons par nous rendre compte de la manière dont nous devons représenter par une courbe les états successifs du courant inducteur pendant ses périodes d'établissement ou de cessation.

Sur une droite telle que OP, portons à partir du point O des longueurs proportion-

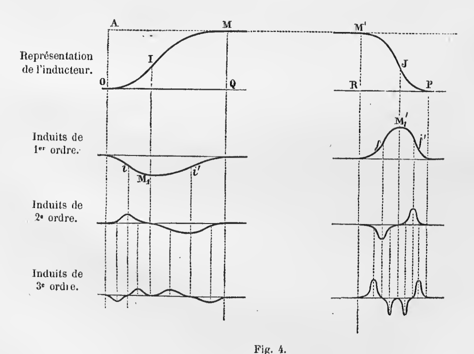


Fig. 4.

nelles aux temps écoulés depuis l'instant de la fermeture du circuit, et sur des perpendiculaires à cette droite prenons des longueurs proportionnelles à l'intensité du cou-

rant à ces différents instants. Pendant le temps OQ de l'établissement du courant, la loi de son intensité sera représentée par un arc de courbe tel que OIM caractérisé par des ordonnées continuellement croissantes, puis à partir d'un certain point M l'ordonnée sera constante et la courbe deviendra une parallèle à l'axe des temps, parce que, à partir de ce moment, l'intensité du courant est elle-même constante.

Si au bout d'un certain temps OR on vient à rompre le circuit, l'intensité du courant diminue très-rapidement jusqu'à devenir nulle et la courbe retombe sur l'axe des temps. La durée de cette période de cessation est très-courte, et il faut même considérer qu'elle doit être plus courte que la période d'état variable correspondant à l'établissement du courant, voilà pourquoi nous avons fait la longueur RP plus courte que OQ.

Cette inégalité des deux périodes d'établissement et de cessation peut se déduire de certaines considérations *à priori*, notamment de l'hypothèse d'une résistance des conducteurs qui serait particulière à l'état variable des courants, et que j'ai appelée *résistance dynamique* (1). Mais cette même inégalité de durée peut être aussi regardée comme un fait d'expérience nécessaire à admettre pour justifier les phénomènes observés, non-seulement dans le cas de circuits rectilignes juxtaposés, cas très-rarement réalisé, mais aussi dans le cas, seul usuel mais plus complexe, de circuits enroulés dont les diverses parties réagissent les unes sur les autres.

Admettons donc, dès à présent, que la durée de la période de cessation est moindre que celle de la période d'établissement, et continuons à tirer de ce fait les conclusions qu'il importe de faire ressortir.

13. — La première est relative à la forme des arcs de courbe OIM et M'JP. Ce qu'il y a de plus simple, et en même temps de plus conforme à l'ensemble des phénomènes, est de supposer que le premier est tangent en O à l'axe des temps et en M à la parallèle à cet axe qui représente la période d'intensité constante. Il faut nécessairement qu'entre ces deux régions extrêmes sa courbure change de sens, et la manière la plus simple de concevoir ce changement est d'imaginer l'existence d'un point d'inflexion, en I par exemple ; la position de ce point pourra d'ailleurs partager d'une manière quelconque la distance entre les points O et Q. Nous admettrons la même disposition pour l'arc MJP, mais nous supposerons en outre qu'au point d'inflexion J, l'inclinaison de la tangente à la courbe sur l'axe des temps soit plus considérable qu'en I. Il résulte évidemment de là et de ce que nous avons établi ci-dessus sur les relations qui existent entre les courants inducteurs et induits que les maxima des induits inverse et direct, qui sont proportionnels aux tangentes trigonométriques de ces inclinaisons, doivent

(1) Voir *Études sur les machines électro-magnétiques et magnéto-électriques*, Annales du Conservatoire des Arts et Métiers, tome Ier, page 582.

être inégaux, et que celui de l'induit direct est le plus grand. Comme, d'autre part, l'expérience fait connaître que les quantités d'électricité mises en jeu dans les deux

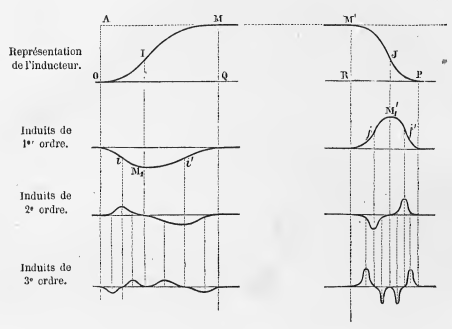


Fig. 4.

induits sont égales et que la durée de l'induit direct est moins grande que celle de l'induit inverse, puisque ces durées sont les mêmes que celles des états variables, l'induit direct augmentera et tombera plus rapidement que l'induit inverse.

Ces deux induits du premier ordre présenteront chacun deux points d'inflexion : le premier en i et i', le second en j et j'.

L'action des induits du premier ordre, agissant comme inducteurs sur le circuit suivant, s'analyserait d'après les mêmes principes, et conduirait à cette conclusion que les induits d'établissement et de cessation se composent chacun de deux parties de sens inverses, les maximums des seconds étant plus saillants que ceux des premiers.

Chacun des systèmes de courants induits du troisième ordre se compose de quatre parties de sens successivement inverses, et ainsi de suite, de telle sorte que chacun des systèmes d'induits du $n^{ième}$ ordre comporte 2^{n-1} courants alternativement de sens contraires.

14. — En ce qui regarde les intensités comparatives, il est bien évident qu'elles vont en décroissant car, dans tous les cas, l'intensité décroît considérablement de l'inducteur à l'induit. D'un autre côté, à mesure que l'ordre des induits s'élève, les alternatives d'inversion de sens sont de plus en plus rapides, et c'est à cette circonstance que l'on doit attribuer l'intensité supérieure apparente que peuvent manifester, dans

certains cas, par exemple dans les actions physiologiques, les courants induits d'ordre supérieur au premier. L'étude de toutes nos sensations amène en effet à cette conclusion que l'action des divers agents qui les provoquent est plus sensible lorsqu'elle est intermittente que lorsqu'elle est continue. En ce qui concerne l'électricité, une quantité très-faible employée d'une façon intermittente pourra produire des effets sensoriaux, tels que commotions, contractions, douleurs, beaucoup plus énergiques qu'une quantité plus grande employée d'une manière continue, et cela même à intensité égale; quant à l'effet curatif, c'est à la médecine qu'il appartient de l'apprécier suivant les cas.

15. — *Induction d'un courant sur son propre circuit. — Extra-courant.* — Considérons (fig. 5) un circuit d'une grande longueur enroulé suivant une hélice à spires très-rapprochées, ainsi que cela se trouve réalisé dans les bobines des appareils que nous étudierons par la suite. Cela posé, imaginons que nous venions à fermer le circuit d'une pile par cette hélice. Chacune des spires est pendant toute la durée de la période d'établissement le siége d'un courant variable; considérons en particulier une spire *a b*, elle induira par ce fait, dans toutes les spires qui la précèdent ou qui la suivent, des courants de sens contraire à celui qui s'établit: j'indique le sens de ces induits par de petites flèches non empennées. On voit que, quelle que soit la position de la spire considérée, son effet sera le même sur toutes les autres, à l'intensité près; un courant inverse de celui de la pile prendra donc naissance et ralentira son établissement, et cela avec d'autant plus d'énergie que les spires seront plus nombreuses et plus rapprochées les unes des autres.

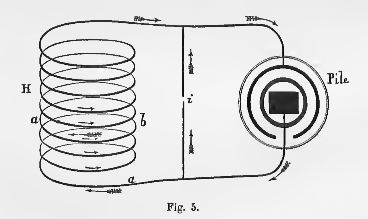


Fig. 5.

Pendant l'établissement du courant, la bobine se comporte, d'une part, comme présentant une résistance plus grande que lorsque le courant a atteint la permanence, d'autre part, comme étant le siége d'une force électro-motrice inverse de celle du courant qu'on cherche à établir. Il est facile de manifester cet effet : en *i*, sur le trajet d'une dérivation, on établit un galvanomètre dont on laisse l'aiguille se fixer dans la position d'équilibre qui lui convient sous l'influence du courant dérivé, pendant l'é-

tat permanent; cela fait, on dispose un obstacle qui empêche l'aiguille de revenir au zéro, puis on interrompt le courant en supprimant l'un des contacts avec la pile. Or, au moment où l'on vient à rétablir ce contact, on voit l'aiguille vivement déviée au delà de la position qu'elle occupe. Il faut donc conclure de cette expérience que le courant dérivé est plus fort pendant le temps de l'établissement du courant que pendant l'état permanent, car le courant qui traverse la dérivation peut, pendant le temps très-court de cet établissement, mener l'aiguille plus loin que ne peut le faire, pendant un temps aussi long que l'on veut, le courant permanent. Ainsi l'action de la bobine est bien celle que nous avons annoncée.

16. — Des effets du même genre, mais d'un sens différent, se produisent lorsqu'on rompt le circuit; alors la bobine se comporte comme si sa résistance diminuait, et en même temps la force électro-motrice induite change de sens et prend celui du courant inducteur, il faut dans ce cas changer le sens des petites flèches non empennées. Si on avait arrêté au zéro l'aiguille du galvanomètre placé en *i* de manière qu'elle ne pût se mouvoir que dans le sens inverse de celui où la pousse le courant dérivé pendant l'état permanent, on verrait au moment où l'on interrompt le contact avec la pile, l'aiguille vivement déviée par l'effet du courant dont la bobine est le siége.

Le courant induit qui prend ainsi naissance dans un circuit au moment de sa rupture porte le nom d'*extra-courant*.

Si, au lieu de placer en *i* un galvanomètre, on y place une partie du corps humain, on éprouve des secousses plus ou moins intenses.

Si la discontinuité en *i* est assez petite, la disposition de la bobine convenable, et l'intensité de la pile suffisante, la tension de l'extra-courant peut être assez grande pour vaincre la résistance de l'air, et une étincelle jaillit en *i*.

17.—Les effets de l'extra-courant peuvent s'observer sans avoir recours à un courant dérivé : étant donnés une pile et un conducteur rectiligne d'une certaine longueur, si on fait passer le courant dans ce conducteur et qu'on l'interrompe en un point I (fig. 6), on voit une étincelle qui est d'autant plus faible que le conducteur est plus long; mais si on enroule en hélice ce même conducteur, l'étincelle devient beaucoup plus vive, et cet effet augmente dans une certaine limite avec la longueur du conducteur. Dans ce cas l'extra-courant traverse la pile et s'ajoute à celui de celle-ci pour franchir l'interruption et entretenir pendant un temps qui devient facilement appréciable le petit arc voltaïque qui constitue l'étincelle.

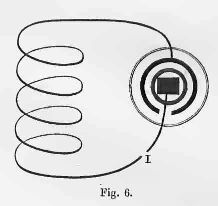


Fig. 6.

18.— Il n'est peut-être pas inutile de résumer par des figures la comparaison à établir entre la manière dont un circuit se comporte vis-à-vis d'un courant pendant les périodes d'établissement et de cessation suivant qu'il est disposé ou non de manière

à faire naître des actions inductrices entre ses diverses parties, lorsqu'il est par exemple rectiligne ou enroulé en hélice.

La force électro-motrice de la pile et la résistance du circuit étant supposées les mêmes dans les deux cas, l'intensité du courant a la même valeur pendant l'état permanent, mais cet état permanent doit être plus long à atteindre dans le second cas que dans le premier, en supposant au moins que la quantité d'électricité nécessaire pour charger le fil soit la même dans les deux cas. On comprend en effet que la force électro-motrice inverse résultant de l'induction venant diminuer à chaque instant l'intensité du courant, il en résulte que dans le second cas il faudra plus de temps pour laisser passer la même quantité. Dans la période de cessation, comme aucune force extérieure

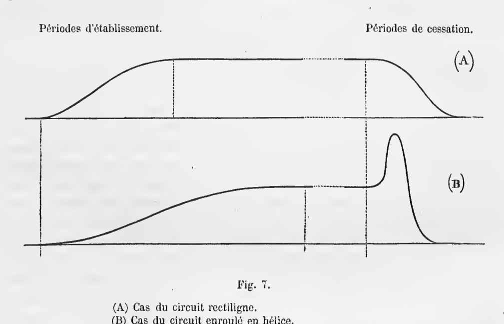


Fig. 7.

(A) Cas du circuit rectiligne.
(B) Cas du circuit enroulé en hélice.

n'intervient, et qu'on ne peut pas imaginer que l'induction crée de l'électricité, il faut admettre que la quantité d'électricité qui s'écoule pendant cette période est la même dans les deux cas et comme la force électro-motrice d'induction qui prend naissance dans le second cas favorise cet écoulement, on doit admettre aussi qu'il sera plus rapide que dans le premier. L'intensité pourra même devenir plus grande à un certain moment que celle du courant à l'état permanent. C'est ce que nous avons essayé de figurer par les courbes ci-dessus (fig. 7).

En rapprochant ces figures de celles de la page 12, qui indiquent le mode de filiation des courants induits des divers ordres, on voit quelle modification profonde on apportera dans l'économie de ceux-ci en substituant au courant inducteur [A] un inducteur [B], modifié lui-même par les réactions de ses diverses parties. Il arrivera, en effet, que tous les induits d'établissement subiront une sorte d'aplatissement, tandis que ceux de rupture, en même temps qu'ils se doubleront, éprouveront une

véritable exacerbation. Dans la figure 8 nous nous sommes proposé de représenter l'induit de premier ordre d'un extra-courant de rupture.

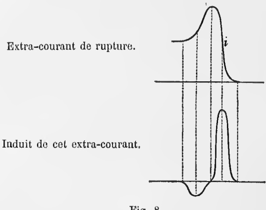


Fig. 8.

19. — Il faut, toutefois, se prémunir contre une induction erronée de ces raisonnements, qui pourrait faire croire à la possibilité d'augmenter, pour ainsi dire indéfiniment, l'intensité des induits. Il n'en est rien, car un circuit qui modifie son propre courant d'une manière aussi marquée que nous venons de le voir dans le cas où il est seul à agir sur lui-même, tend à se rapprocher de l'état d'inaction sur lui-même lorsqu'il est avoisiné par un conducteur parallèle, dans lequel l'effet d'induction peut se manifester au même titre que sur lui-même. On a une preuve très-manifeste de cette différence de distribution en prenant deux fils de même longueur que l'on enroule ensemble en hélice : appelons-les C et C_1. Si dans C on fait passer le courant d'une pile, le circuit de C_1 restant ouvert, on observe une augmentation de l'étincelle de rupture due à l'extra-courant; mais elle diminue très-notablement lorsque le circuit C_1 est fermé de manière à pouvoir laisser le passage libre à l'induit qui s'y développe.

20. — Il n'est pas sans intérêt d'essayer de se rendre compte de cette différence d'action au premier abord si mystérieuse, d'un circuit induit sur un inducteur suivant qu'il est ouvert ou fermé.

Raisonnons dans le cas de l'établissement du courant dans l'inducteur.

Lorsqu'il est ouvert, le circuit induit n'en éprouve pas moins l'influence de l'inducteur; cette influence se traduit à ses extrémités par des tensions d'électricités contraires, tensions que l'électroscope peut manifester, et qui sont telles dans certains cas que si la distance qui sépare les deux extrémités du conducteur n'est pas trop grande, la résistance de la couche d'air interposée peut être vaincue, et que le courant s'établit sous forme d'étincelle. Si la recomposition n'a pas lieu par cette voie, lorsque la force inductrice a dépassé son maximum, les électricités se recombinent à l'intérieur du fil induit et y déterminent un courant finissant de sens contraire au courant inducteur, lequel à son tour induit dans le circuit inducteur un courant de même sens que le courant primitif,

qui se trouve ainsi plus ralenti que si le circuit induit eût été fermé, mais moins cependant que si ce circuit voisin n'eût point existé.

On analyserait de même le cas de la cessation.

21. — Pour produire cette altération de l'économie des courants induits il n'est pas nécessaire que la masse accessoirement induite ait la forme d'un fil enroulé parallèlement au fil inducteur, il suffit que celui-ci soit avoisiné d'une masse dans laquelle l'induction puisse en quelque sorte se choisir la route qui lui convient le mieux. Ainsi, étant donnée une hélice inductrice, il suffit de placer dans son intérieur un tube de métal qui la remplisse exactement, ou de l'envelopper d'un tube du même genre, pour voir cesser presque complétement les effets de tout genre que pourrait produire cette hélice inductrice.

Cette circonstance est mise à profit dans la plupart des appareils électro-médicaux afin de permettre de graduer facilement l'intensité des courants induits; il suffit en effet de rendre mobile la masse perturbatrice, qui est ordinairement un tube de cuivre, de manière à en mettre une plus ou moins grande longueur en prise avec l'hélice inductrice.

D'un autre côté, quand on veut utiliser autant que possible les effets de l'induction, il faut éviter de faire entrer dans la construction des appareils des masses métalliques pouvant offrir des circuits fermés; ainsi, les bobines doivent de préférence être en substances non conductrices de l'électricité, telles que le bois, le verre, le caoutchouc durci, le carton, etc. Si, pour des raisons de solidité, on est obligé d'employer des pièces métalliques, on doit avoir soin d'y pratiquer des solutions de continuité qui interrompent spécialement les circuits qu'on pourrait dessiner dans ces masses parallèlement aux spires inductrices. C'est ainsi que si des bobines sont construites avec des rondelles terminales de métal, on doit fendre celles-ci dans le sens d'un rayon; les machines magnéto-électriques qu'on a construites sur le principe de celles de Clarke, pour la production industrielle de l'électricité (1), offrent un exemple de cette disposition.

22. — *De l'induction par les aimants.* — Nous avons dit ci-dessus que le sens des effets des actions inductrices était prévu, dans tous les cas, par une loi due au physicien russe Lenz, et qui se formule ainsi : « Toutes les fois qu'on produit un déplacement relatif entre un courant et un circuit fermé à l'état naturel, le sens du courant d'induction qui s'y établit est tel qu'il tend à s'opposer au mouvement qui donne lieu à l'induction. »

Cette loi n'est évidemment qu'un cas restreint d'un principe plus général applicable à toutes les actions qui peuvent exister entre les conducteurs parcourus par des courants et des systèmes quelconques; tel est le cas des aimants dont les rapports avec les courants constituent l'*électro-magnétisme*. D'après cela, le mouvement relatif entre un

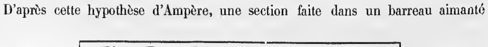
(1) Voir *Les machines magnéto-électriques françaises, et l'application de l'électricité à l'éclairage des phares,* par F. P. Le Roux; Paris, Gauthier-Villars, 1868, et *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'industrie nationale,* année 1867.

aimant et un circuit fermé à l'état naturel devra engendrer dans ce dernier un courant d'induction, dont le sens sera tel qu'il tendra à déterminer un mouvement de sens contraire à celui dont l'existence détermine l'induction.

Tout problème d'induction par les aimants se ramène donc à un problème d'électro-magnétisme. Nous pourrions alors étudier l'induction magnétique en partant des lois de l'électro-magnétisme. Mais Ampère a rattaché par des hypothèses fort heureuses, qui jusqu'ici n'ont pas été trouvées en défaut, le magnétisme à l'électro-dynamique; on peut donc rattacher l'induction magnétique à l'induction électrique. C'est la voie qui me paraît la plus appropriée au but spécial de cette étude, dans laquelle nous avons à considérer des appareils où l'on voit sans cesse ces deux genres d'induction tendre simultanément au même but.

23. — On sait, et c'est à Arago qu'est due cette belle découverte, que des tiges de fer doux placées dans l'intérieur d'une hélice parcourue par un courant électrique prennent une aimantation qui cesse avec le passage du courant ; si ces tiges sont d'acier trempé, elles s'aimantent de même, mais d'une manière permanente. L'action d'un barreau ainsi aimanté sur un système extérieur, soit magnétique, soit électro-dynamique, est de même sens que celle de l'hélice dans laquelle il est placé, mais elle est plus énergique. L'idée d'Ampère a été de ramener l'aimantation à une orientation de courants parallèles, d'après ce principe que l'action mutuelle de deux courants, dont l'un au moins est mobile dans toutes les directions possibles, tend à les ramener au parallélisme et à la même direction. Son hypothèse, c'est qu'il existerait dans l'intérieur des corps magnétiques des courants élémentaires circulant autour de certains groupes d'atomes. Dans les corps magnétiques non aimantés, dans un barreau de fer doux, par exemple, ces courants seraient orientés dans toutes les directions ; mais le voisinage d'un aimant ou bien d'un courant pourrait donner à ces courants particulaires une orientation déterminée, de telle sorte que la résultante de leurs actions sur un point extérieur ne serait plus nulle comme avant leur orientation ; le barreau de fer doux deviendrait aimanté.

D'après cette hypothèse d'Ampère, une section faite dans un barreau aimanté



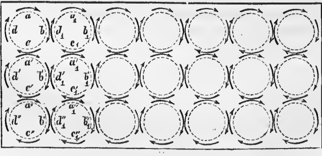


Fig. 9.

perpendiculairement à la ligne des pôles serait représentée, comme dans la fig. 9, par une certaine quantité de courants fermés, que nous représentons circulaires, et qui

seraient tous dirigés dans le même sens, comme l'indiquent les flèches qui sont figurées à côté de chacun d'eux.

Mais d'après une loi expérimentalement démontrée par Ampère, les actions de deux courants infiniment voisins sur tout autre système de courants ou d'aimants, se détruisent si ces deux courants voisins sont de sens contraire et de même intensité. On voit donc que les portions a et a' de deux courants particulaires contigus vont s'annuler; il en sera de même des portions c' et a''; il n'y aura donc d'efficaces, dans toute cette première pile verticale, que les parties extérieures a, d, d' d'' et c'', car les parties intérieures b, b' b'', dont nous n'avons pas encore parlé, sont détruites par les portions voisines d_1, d_1', d_1'' de la pile voisine; de cette pile, il n'y aura d'ailleurs d'efficaces que les parties extérieures a_1 et c_1''.

En continuant de raisonner ainsi, on voit facilement que les parties extérieures seules de tout le système seront efficaces, de telle sorte que l'effet de l'orientation des courants particulaires équivaudra (fig. 10) à la création d'un courant qui parcourrait le

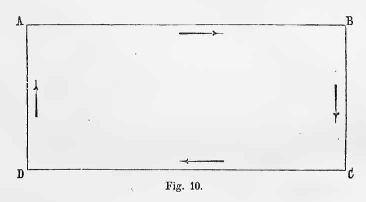


Fig. 10.

périmètre ABCD de la section considérée. Deux côtés opposés AB et CD de cette section étant de sens contraire, leurs actions sur un système extérieur seront contraires. Mais si nous supposons que ce système extérieur soit placé sensiblement dans le plan ABCD, et du côté de AB, par exemple, l'action de cette partie sera prédominante, et cela d'autant plus que AB et CD seront séparées par une plus grande distance, car toutes ces actions sont régies par la loi de la raison inverse du carré des distances. L'action de l'aimant sera donc d'autant plus forte que AB et BC, c'est-à-dire les deux dimensions de la section seront plus grandes. Les mêmes considérations s'appliqueraient évidemment à une section de toute autre forme.

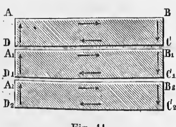


Fig. 11.

24. — Quand on place à côté l'un de l'autre divers barreaux aimantés, les actions de deux parties voisines CD et A_1B_1 se détruisent, car elles sont de sens contraires et supposées égales; l'effet d'un faisceau tel que celui dont la fig. 11

représente la coupe sera donc le même que celui d'un barreau unique qui aurait pour section $A B C_2 D_2$.

25. — Dans un grand nombre d'appareils où l'on emploie des aimants soit permanents, soit temporaires, on trouve commode de replier ceux-ci en forme de fer à cheval. Cette forme ne change rien aux propriétés fondamentales de ces aimants ; elle ne fait que rendre plus facilement réalisables certaines dispositions qui ont pour objet de faire agir les aimants sur des systèmes extérieurs en rapprochant l'une de l'autre les extrémités, qui sont les parties dont l'action doit être prédominante ; c'est ce que montre clairement la figure 12 où on a représenté un aimant rectiligne, puis le même

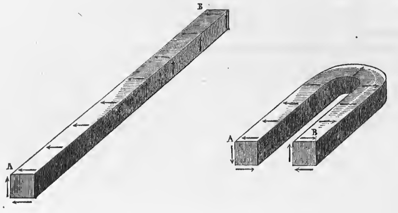


Fig. 12.

supposé recourbé en fer à cheval. On voit de plus, et cette circonstance est à noter, que dans ce dernier les courants d'Ampère sont symétriques par rapport à un plan équidistant des branches du fer à cheval et symétrique à son plan, et que par conséquent ces courants tournent en sens inverse.

26. — On conçoit maintenant qu'il doit être facile de ramener l'action inductrice des aimants à celle des courants : si on approche un aimant d'un courant, c'est comme si on en approchait un solénoïde (1) traversé par un courant ; si on fait naître l'aimantation dans un fer doux mis en présence d'un circuit, c'est comme si on faisait naître un courant dans le solénoïde à cercles infiniment rapprochés qui peut être, suivant l'hypo-

(1) Ampère a donné le nom de *solénoïde* à un conducteur replié de manière à présenter la forme d'une série de cercles consécutifs dont les centres sont disposés suivant une courbe quelconque ; une hélice dont les spires sont excessivement rapprochées remplit dans la pratique le même but que la disposition d'un solénoïde rectiligne, c'est le seul genre qui intéresse l'étude des applications de l'induction. On peut d'ailleurs concevoir des solénoïdes dont la section soit d'une forme quelconque autre que le cercle.

thèse d'Ampère, substitué à ce fer doux au moment où il est aimanté; si on fait varier l'aimantation dans un barreau préalablement aimanté, c'est comme si on faisait varier l'intensité des courants qui le constituent, etc.

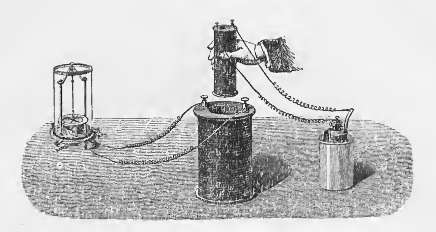


Fig. 13.

27. — On peut classer de la manière suivante les différents cas de l'induction magnétique :

1° On approche un aimant d'un circuit conducteur; généralement ce circuit a la forme d'une hélice dans l'intérieur de laquelle on fait pénétrer le plus rapidement possible un barreau aimanté.

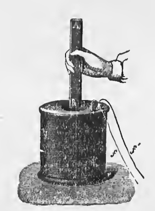


Fig. 14.

La figure 13 montre la disposition de l'expérience en supposant que l'on introduise un solénoïde ou mieux encore une hélice, c'est-à-dire un solénoïde multiple, dans une autre hélice.

Si on introduit dans celle-ci (fig. 14) un aimant de mêmes pôles que celui qui résulterait de l'action de l'hélice mobile du cas précédent l'effet est de même sens.

Ce cas n'intéresse pas les applications, on ne le réalise que pour les besoins de la démonstration.

2° On place dans l'intérieur d'une hélice un barreau de fer doux, et alors (fig. 15) on aimante ou on désaimante ce barreau de fer doux en en approchant un aimant. Dans les applications, ce barreau de fer doux est généralement contourné en forme de fer à cheval, et l'aimant lui-même l'est aussi de manière à faire agir à la fois les deux extrémités du premier sur celles du second.

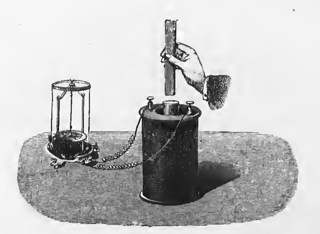


Fig. 15.

Les machines de Pixii, de Clarke, et toutes celles qui en dérivent sont dans ce cas ; nous les étudierons ci-après.

3° On place, comme ci-dessus, un barreau de fer doux dans l'intérieur d'une bobine formée de deux hélices superposées, l'une se compose d'un fil long et fin destiné à être induit ; l'autre, d'un fil gros et court, dans lequel on fait passer un courant fourni généralement par une pile, et qui est destiné à déterminer l'aimantation du fer doux ; on fait cesser cette aimantation en interrompant ce courant.

Tous les appareils électro-magnétiques proprement dits appartiennent à ce type, tels sont les appareils de Masson, de la Rive, Neef, Ruhmkorff, etc., etc. ;

4° On enroule un conducteur autour des parties extrêmes des branches d'un aimant permanent recourbé en fer à cheval, et, en approchant ou éloignant des pôles de cet aimant un contact en fer doux, on détermine une nouvelle distribution du magnétisme dans les branches de l'électro-aimant.

La machine de Page peut être considérée comme le type de cette sorte d'appareils.

28. — Pour prévoir l'action inductrice d'un aimant temporaire ou permanent, il suffit de rechercher quel est le sens dans cet aimant des courants hypothétiques d'Ampère, et d'appliquer les règles ci-dessus établies de l'action des courants sur les circuits.

On trouve ainsi que

un circuit	s'approchant s'éloignant	d'un aimant
est induit	contrairement semblablement	aux courants hypothétiques de l'aimant vers lesquels il marche parallèlement,

Et dans le cas où il s'agit d'une variation d'intensité de l'aimant,

un aimant qui	se renforce s'affaiblit	induit dans un circuit
des courants de sens	contraire semblable	à celui des courants hypothétiques de cet aimant.

29. — Comme les courants qui constituent l'aimantation sont, d'après l'hypothèse même d'Ampère, parallèles au courant aimantant, il s'ensuit que quand un courant qui s'établit vient aimanter un fer doux, la présence de ce fer doux ne fait, en quelque sorte, que renforcer l'action inductrice du courant qui s'établit, puisque ces deux actions conspirent; il en est de même encore au moment où l'interruption du courant vient mettre fin à l'aimantation.

L'aimantation finissante paraît se faire avec plus de rapidité que l'aimantation commençante, car les différences d'intensité de l'induit d'établissement et de l'induit de cessation que nous avons signalées ci-dessus à propos de l'induction d'un circuit sur lui-même se manifestent encore plus remarquablement quand on place dans une hélice un barreau de fer doux.

30. — Il y a lieu d'étudier maintenant quelles sont les conditions les meilleures, dans les différents cas, pour les dispositions à donner aux masses de fer doux qui servent ainsi à renforcer l'induction. Elles agissent d'une double manière : 1° comme corps magnétiques et leur action est celle que nous venons d'analyser, 2° comme corps conducteurs présentant des circuits fermés dans l'intérieur desquels s'induisent des courants dont l'effet est, ainsi que nous l'avons remarqué plus haut, de réagir sur ceux que l'on veut utiliser et d'en diminuer la quantité et surtout l'intensité.

M. Dove, à l'aide de son inducteur différentiel, a mis pleinement en évidence cette double action des masses de fer intérieures aux hélices et l'inégalité d'action qu'elles présentent au point de vue des divers effets qu'on veut obtenir des courants d'induction. Cet appareil, dont la fig. 16 donne une coupe, se compose de deux bobines inductrices A et B aussi identiques que possible et enveloppées de deux bobines induites C et D également identiques. Ces deux bobines inductrices sont creuses, on peut mettre dans leur intérieur, en M par exemple une masse compacte de fer doux, et en N des tiges de diverses nature ou grosseur, en nombre plus ou moins grand. En faisant passer un courant de même sens dans les deux bobines inductrices vides on obtient dans les deux bobines induites des courants identiques,

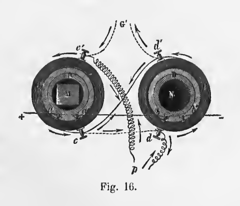


Fig. 16.

ce qu'on vérifie en les réunissant par des pôles opposés c et d' et interposant entre les fils c' et d soit un galvanomètre, soit un voltamètre, soit le corps humain. Cette égalité cesse à l'avantage de la bobine de gauche lorsqu'on y introduit un barreau compacte de fer doux M, la bobine de droite restant vide. Au contraire celle-ci arrive à l'emporter sur la première si on la remplit d'un faisceau de fils de fer.

Les conditions d'égalité sur le galvanomètre ou sur le corps humain ne sont pas les mêmes. Ainsi M. Dove a reconnu que, pour équilibrer sur le galvanomètre l'action des deux hélices induites, il fallait, lorsque l'une d'elles contenait un cylindre de fer forgé, plus de **110** morceaux d'un certain fil de fer, tandis que **15** suffisaient pour équilibrer l'action physiologique. Avec un cylindre d'acier trempé, **28** et **7** fils suffisaient dans les mêmes circonstances ; avec un cylindre d'une certaine fonte grise, **27** et **11**.

Il a également soumis à ces expériences comparatives différentes espèces de fer, et le classement résultant de l'action galvanométrique n'a pas été le même que celui résultant de l'action physiologique. On a trouvé que la fonte brute grise était, de toutes les espèces de fer, celle qui se rapprochait le plus des paquets de fils quant aux effets d'induction, ce qui tient, sans doute, à la discontinuité des molécules de fer susceptibles d'aimantation.

Des tubes de fer non fendus et d'une certaine épaisseur, comme des canons de fusil, agissent de la même manière que des cylindres pleins et annulent l'effet des fils qu'on peut mettre dans leur intérieur ; il n'en est plus de même, s'ils sont fendus suivant leur longueur ; et ce qu'il y a de curieux, c'est que, dans ce cas, l'introduction d'un certain nombre de fils de fer augmente l'effet physiologique, mais ne change pas l'action sur le galvanomètre. Si les tubes sont minces et fermés, des fils placés dans leur intérieur augmentent les deux genres d'action ; mais, s'ils sont fendus, l'accroissement de l'action physiologique est beaucoup plus marqué.

La conclusion générale à tirer de ces expériences, c'est que la quantité du fer augmente la quantité du courant induit parce qu'il agit comme corps magnétique, tandis que s'il peut agir comme corps conducteur, il diminue la tension ; en divisant sa masse on annule à peu près complétement son effet comme corps conducteur, et on conserve la tension.

31. — En résumé, on voit qu'à tous les points de vue il y a avantage à former les masses de fer qui servent à renforcer l'induction au moyen de fils de fer doux, recouverts d'un vernis pour les isoler les uns des autres. C'est une précaution que les conducteurs ne manquent généralement pas de prendre dans tous les appareils où l'induction est produite par des alternatives d'établissement ou de cessation d'un courant électrique. On la néglige dans les petits appareils magnéto-électriques, parce qu'elle offre quelques difficultés de construction ; on pourrait aisément, cependant, former les noyaux de fer doux avec des tubes fendus.

II.

DES APPAREILS ÉLECTRO-MÉDICAUX FONDÉS SUR L'INDUCTION.

32. — Les divers appareils mis en usage jusqu'à ce jour ne présentent pas dans leurs effets de différences bien tranchées, ou que du moins la pratique ait pu sûrement apprécier ; il n'y a donc pas lieu de fonder sur ces effets la classification des appareils. La plus naturelle est celle qui les groupe d'après la nature de la force primitive que l'on met en œuvre ; nous sommes amenés ainsi à les partager en deux classes :

A. — Appareils dans lesquels on dépense de la force mécanique pour produire un courant induit, auquel on fait induire ensuite son propre circuit, ou un autre voisin ; ces appareils sont fondés sur le mouvement relatif d'un circuit et d'un aimant, on les appelle *magnéto-électriques*.

B. — Appareils dans lesquels on demande à une action électro-chimique le courant qui doit induire son propre circuit ou un autre voisin ; je propose de les appeler *rhéo-électriques*.

Cette distinction n'a d'ailleurs d'autre raison d'être que de faciliter l'étude de ces appareils, en rapprochant les uns des autres ceux qui présentent des organes similaires.

A.

Appareils magnéto-électriques.

33. — Le premier appareil magnéto-électrique proprement dit fut construit en France, dès 1832, par un constructeur d'instruments de physique au nom duquel s'attache une certaine célébrité, Pixii. Cet appareil n'était pas destiné à des usages médicaux. Nous le décrirons cependant, au moins dans ses organes principaux, parce que le jeu de tous les autres appareils du même genre est à peu près le même.

L'appareil de Pixii est représenté par la figure 17 ; AB est un fer doux recourbé en forme de fer à cheval et sur lequel s'enroule un fil de cuivre isolé dont les extrémités sont en XY ; cet électro-aimant est fixe. En face de lui, est situé un aimant permanent dont les pôles se voient en C et D. Cet aimant est entraîné par un axe vertical MN, sur lequel est monté un pignon I auquel une roue K communique le mouvement ; une manivelle L sert à mettre l'appareil en action.

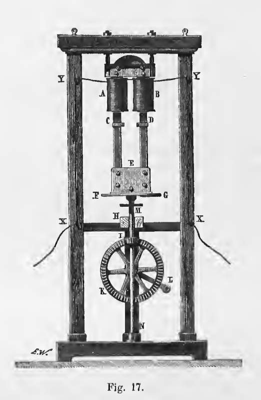


Fig. 17.

Comme on le voit, les pôles C et D de l'aimant permanent s'approchent et s'éloignent alternativement des extrémités de l'électro-aimant ; il s'induit donc dans le fil de celui-ci un courant qui change de sens à chaque demi-tour. Dans l'appareil original de Pixii, une sorte de came placée en G avait pour fonction de manœuvrer un commutateur, qu'en raison de sa complication nous n'avons pas représenté ici ; il suffit de dire que cette partie de l'appareil avait pour fonction de diriger le courant induit toujours dans le même sens. La machine de Clarke nous donnera ci-après un exemple d'un organe plus simple et mieux approprié à ces fonctions.

On reproduisait à l'aide de l'appareil de Pixii tous les effets des courants, chaleur, lumière, décompositions chimiques, etc.

34. — Pour nous rendre compte de l'effet de la disposition qui vient d'être décrite, figurons (fig. 18) les projections A et B des bobines et des pôles N et S de l'aimant sur le plan que décrivent ceux-ci dans leur mouvement de rotation, celle-ci étant supposée s'effectuer dans le sens indiqué par les flèches.

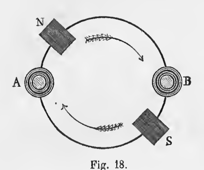


Fig. 18.

Le pôle N s'éloigne de la bobine A; le pôle S s'en rapproche; comme ces deux pôles sont de noms contraires, leurs actions sur la bobine A conspirent.

Elles conspirent de même sur la bobine B, mais le courant engendré dans cette bobine est inverse de celui qui prend naissance dans la bobine A; pour que ces courants s'ajoutent, il n'y a qu'à faire communiquer, d'une manière convenable, les fils qui sont enroulés sur les bobines; il suffit d'ailleurs pour cela que, si on suppose le fer à cheval redressé, le fil se trouve enroulé dans le même sens sur les deux branches.

L'action inductrice est minimum lorsque les pôles sont à égale distance des deux bobines, mais elle n'est pas nulle. Au moment où les pôles sont très-près des bobines, l'action est beaucoup plus grande, elle atteint son maximum lorsque les pôles se trouvent en face des bobines; mais à ce moment l'induction change de sens, parce que le mouvement qui rapprochait chacun des pôles de la bobine devant laquelle il passe l'en éloigne alors.

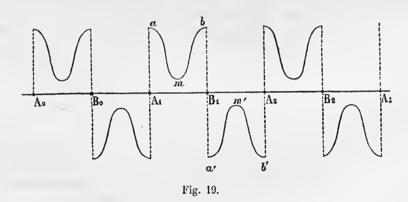


Fig. 19.

La courbe des intensités du courant peut donc être représentée comme dans la figure 19 où la distance $A_0 B_0$ représente le temps qu'un même pôle met à passer de la bobine A à la bobine B, et ainsi de suite.

En réalité, le passage d'un arc positif *a m b* à l'arc négatif *a' m' b'* qui le suit ne s'opère pas aussi brusquement que cela est indiqué ici; cela tient à ce que les extrémités des aimants et des bobines ne sont pas des points mathématiques, et possèdent

même des dimensions transversales relativement considérables. Nous reviendrons ci-après sur cette question.

35. — Remarquons immédiatement, quoique ceci soit étranger à l'appareil de Pixii que, si on faisait agir sur un deuxième circuit le courant engendré on obtiendrait un induit, lequel serait un induit du second ordre par rapport à l'induction magnétique, et dont la distribution serait celle indiquée par la figure 20.

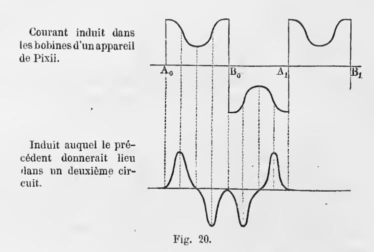


Fig. 20.

Nous ferons remarquer que la courbe supérieure est une représentation idéale de l'intensité du courant induit par les variations de distance des bobines et des aimants, et telle qu'on l'obtiendrait en ne tenant compte que de l'influence de cette circonstance; cette courbe offre une forme parfaitement symétrique. Mais ce courant variable pouvant induire un second circuit induira le sien propre, de telle sorte qu'on aurait très-approximativement la vraie courbe des intensités du courant des bobines en ajoutant algébriquement les ordonnées de la courbe supérieure et celles de la seconde réduites dans un certain rapport. Le résultat final serait de détruire la symétrie et de déplacer les minima comme s'il y avait un retard.

36. — *Appareil de Saxton.* — On reconnut bien vite qu'il n'était pas utile, et qu'il était peut-être même nuisible, de rendre l'électro-aimant aussi massif que le faisait Pixii, tandis qu'il fallait augmenter, le plus possible, la puissance de l'aimant permanent. Il devenait alors plus commode de laisser le second fixe et de rendre le premier mobile. C'est ce que fit Saxton, qui rendit l'appareil de Pixii plus près d'être portatif, en plaçant l'aimant horizontal, le laissant fixe et faisant mouvoir l'électro-aimant ou bobine induite autour d'un axe parallèle au plan de l'aimant.

C'est encore le principe de Pixii que nous retrouverons dans l'appareil suivant, qui tout en offrant une disposition moins heureuse au point de vue théorique n'en a pas moins commencé le succès des appareils d'induction dans les applications médicales.

37. — *Appareil de Clarke.* — Il y avait un moyen de rendre l'appareil encore moins encombrant, sans lui faire perdre notablement de sa puissance : c'était de placer l'aimant vertical et de faire mouvoir l'électro-aimant autour d'un axe horizontal XX′ (fig. 21), de façon que ses extrémités effectuassent leur révolution dans un plan parallèle aux branches de l'aimant permanent.

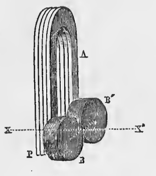


Fig. 21.

Telle est la disposition réalisée par Clarke et représentée dans la fig. 22. L'aimant permanent est en E ; l'axe autour duquel se meut l'électro-aimant est représenté en *oo″*. Cet axe porte un pignon sur lequel passe une chaîne à la Vaucanson, entraînée par une grande roue G, que l'on met en mouvement au moyen d'une manivelle M.

L'électro-aimant n'est plus, comme dans l'appareil de Pixii, un même morceau de fer doux recourbé en fer à cheval : ce sont deux bobines distinctes B et B′ (fig. 23), dont les noyaux de fer doux sont réunis, d'un côté, par une traverse de même matière V, et de l'autre par une seconde traverse d'une

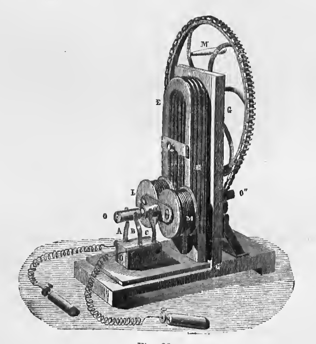


Fig. 22.

matière non magnétique. Cette disposition est équivalente à celle d'un électro-aimant formé d'une seule masse, mais elle est plus facile à réaliser et moins encombrante.

L'analyse des courants produits par ce dernier appareil est la même que pour l'appareil de Pixii; les courants changent de sens à chaque demi-révolution des bobines. Quand on veut avoir un courant qui soit toujours de même sens, il faut interposer entre la bobine et le lieu où l'on veut utiliser l'électricité un appareil auquel on donne le nom de *redresseur des courants,* et aussi de *commutateur.*

Voici la description de cette pièce dans l'appareil de Clarke (fig. 23) : un manchon J formé d'une matière isolante est monté sur l'une des extrémités de l'axe autour duquel sont entraînées les bobines; deux demi-cylindres métalliques, *o* et *o'*, laissant entre eux deux légers intervalles diamétralement opposés, sont appliqués sur ce manchon. Chacun d'eux communique d'une manière permanente avec une des extrémités du fil des bobines; deux ressorts *b* et *c* sont constamment appliqués sur ces demi-cylindres. On voit que par la rotation du système, chacun d'eux vient successivement se mettre en contact avec chacun des deux ressorts. Cela posé, si en ce moment le sens du courant est tel que l'indique la flèche placée en *b*, et si, à l'instant où ce sens changera à l'intérieur des bobines, c'est la lame *o* qui vient en contact avec le ressort *b*, on voit que le courant conservera la même direction dans ce ressort, et par conséquent dans le circuit extérieur *m p n*.

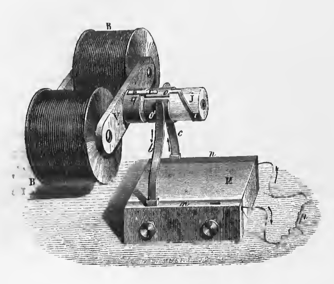


Fig. 23.

38. — Quand on veut manifester des effets physiologiques, on peut recueillir les courants sans les redresser, mais les effets sont encore peu énergiques. On augmente l'énergie de la secousse en mettant à profit l'intensité d'un extra-courant finissant que l'on fait naître par l'artifice que voici.

Les plaques métalliques *m* et *n* (fig. 23) communiquant, je suppose, avec les conducteurs que l'on voit représentés dans la fig. 22, et le circuit étant fermé par une portion quelconque du corps humain, si on vient à faire communiquer entre eux par un arc métallique les deux demi-cylindres *o* et *o'*, le circuit se fermera de préférence par ce chemin dont la résistance est extrêmement plus faible que celle d'une partie quelconque de notre corps, et celui-ci ne recevra presque rien; de plus, le courant dans les bobines aura l'intensité maximum qu'il puisse acquérir pour la vitesse donnée

de la machine, puisque la résistance extérieure sera à peu près nulle. Si on vient alors à interrompre la communication métallique entre les deux demi-cylindres *o* et *o'*, l'intensité du courant sera réduite presque à zéro en raison de la grande résistance du trajet offert par le corps humain, et il s'induira dans la bobine un courant de rupture dont l'intensité, comme on le sait, est très-grande, parce que sa force électromotrice est considérable ; il emprunte d'ailleurs à sa faible durée une qualité physiologique nouvelle.

Cet extra-courant sera d'autant plus fort que le courant dont la rupture sert à l'engendrer sera lui-même plus puissant ; c'est donc vers l'instant de la coïncidence des pôles et des bobines que cette interruption devra se produire.

Toutes ces conditions se réalisent évidemment en adaptant à la plaque *m* un second ressort analogue au ressort *b* et qui vient porter sur le segment cylindrique *i*, lequel communique lui-même avec le demi-cylindre *o*.

39. — *Appareil de Page*. — Quand on approche ou qu'on éloigne un contact de fer doux des extrémités polaires d'un aimant permanent on détermine dans ses branches des variations de magnétisme : on peut s'en servir pour induire un circuit, c'est ce qu'a fait le physicien américain qui a donné son nom à l'appareil que nous allons décrire.

A cet effet, il a entouré de bobines d'un fil long et fin les extrémités des branches d'un aimant permanent ; au moyen d'une vis de rappel mue par une manivelle D (fig. 24), on peut avancer cet aimant plus ou moins près d'un contact de fer doux EF monté perpendiculairement sur le même axe qu'un pignon auquel une roue dentée

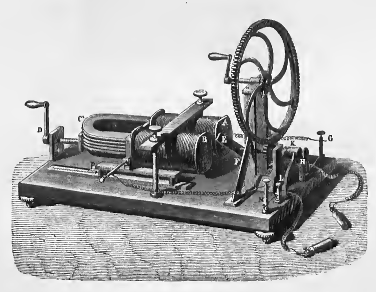


Fig. 24.

communique un mouvement assez rapide. C'est un moyen de graduer l'intensité des

courants produits. Ceux-ci se recueillent comme dans la machine de Clarke, par un commutateur monté sur le même axe que le contact; on lui adjoint un interrupteur K du même genre que celui qui vient d'être décrit et qui est disposé pour la production d'un extra-courant destiné aux actions physiologiques.

Dans l'appareil représenté ci-contre (1), la position de ce commutateur peut se régler relativement à celle du contact, de manière à permettre d'obtenir le maximum d'effet, et à étudier quelques circonstances de la production des courants induits.

Il faut remarquer que dans l'appareil de Page, pour une révolution complète du contact, on a quatre courants induits changeant alternativement de sens, tandis que dans les appareils précédents, qui se rapportent au type Pixii, il n'y en avait que deux.

Appareil de Dujardin. — Construit sur les mêmes principes que le précédent.

40. — *Appareil de MM. Breton frères.* — Son principe est aussi le même que celui de l'appareil de Page, mais ce fut l'un des premiers appareils facilement transportables qui aient été mis au service de la pratique médicale (fig. 25).

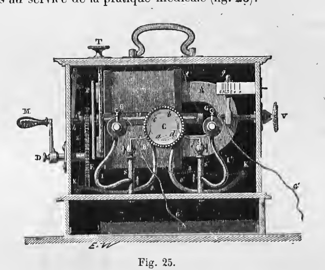


Fig. 25.

Les moyens de graduation sont les mêmes que dans l'appareil de Page.

MM. Breton, à l'exemple de M. Duchenne, enroulent deux hélices autour des branches de l'aimant permanent ; la plus extérieure est formée d'un fil plus fin et plus long que la première, et on peut à volonté utiliser les courants induits qui se développent dans l'une ou l'autre de ces deux hélices, et dans les effets desquels on peut constater certaines différences. Nous examinerons de plus près cette question à propos de l'appareil de M. Duchenne.

---

(1) Construit par M. Ruhmkorff pour le cabinet de l'École Polytechnique ; la figure en est empruntée au *Cours de physique* de M. Jamin, ainsi que celle de l'appareil de Clarke et de l'inducteur différentiel de Dove.

41. — *Appareil de M. Gaiffe.*— C'est à la fois une machine de Saxton et de Page; ou encore si l'on veut, un appareil de Page dans lequel on a remplacé le contact par l'électro-aimant de Clarke (fig. 26).

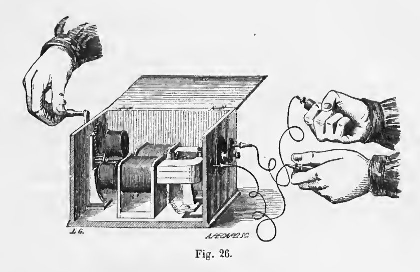


Fig. 26.

Le principal mérite du constructeur de cet appareil a été de comprendre que les aimants ayant une force relative d'autant plus grande que leur poids était moindre, tandis que les forces inductrices croissent rapidement à mesure que les distances diminuent, il y avait tout avantage à diminuer les dimensions des appareils quand on recherche plutôt la tension que la quantité.

Ainsi l'aimant de l'appareil représenté ci-contre ne pèse que 1/2 kilogramme, et porte environ 5 kilogrammes. Les hélices de l'armature sont formées d'un fil de $\frac{2}{10}$ de millimètre de diamètre, et d'une longueur de 170 mètres environ. Celles de l'aimant sont formées par 280 mètres du même fil.

M. Gaiffe estime que les hélices de l'armature fournissent environ les deux tiers de l'effet et celles de l'aimant un tiers seulement.

Les courants de l'armature changent deux fois de sens pendant une révolution de l'axe qui la porte, tandis que ceux des bobines enroulées sur l'aimant en changent quatre fois; les maxima des deux premiers peuvent d'ailleurs être considérés comme concordant avec deux des maxima des seconds; et on fait en sorte, par une disposition des fils, que les sens des courants concordent. Comme les courants changent de sens dans les bobines de l'aimant avant de changer dans celles de l'armature, leurs effets vont s'entre-détruire en partie à un certain moment, à moins d'un commutateur chargé de les redresser isolément en temps utile; mais ce serait introduire une complication extrême et complétement inutile, car les courants produits sont utilisés par un interrupteur du genre de celui que nous avons décrit à propos de la machine de Clarke. Cet interrupteur ne fonctionne qu'au moment du maximum des courants de l'arma-

ture, parce que c'est à ce moment qu'on a établi la superposition additive des deux courants.

L'appareil possède d'ailleurs un redresseur du courant analogue à celui de Clarke, mais qui n'a d'autre usage que donner la même direction aux deux décharges qui s'opèrent à chaque tour; cette direction est indiquée par des signes placés sur les bornes qui servent d'attache aux conducteurs; c'est d'ailleurs un soin qu'on ne saurait trop recommander aux constructeurs, car il peut se faire que le sens des décharges ne soit pas indifférent, et on doit prendre à tâche de fournir aux praticiens toutes les facilités possibles pour tenir compte de cette distinction.

L'appareil de M. Gaiffe a été favorablement apprécié par tous les auteurs qui ont écrit sur la matière, et notamment par M. A. Becquerel (1).

42. — *Appareil de M. Duchenne.* — Cet appareil est sans contredit le plus complet de tous les appareils de ce genre; les ressources qu'il offre pour la graduation des effets et les moyens de les varier sont nombreuses, quelques-uns ont pu même paraître superflus; cependant on ne saurait prononcer, sans trop de circonspection, sur l'identité de l'économie intime de ces phénomènes compliqués que nous n'apprécions que dans leur ensemble. D'ailleurs, il faut bien reconnaître que les efforts de cet auteur n'ont pas été sans influence sur le perfectionnement des petits

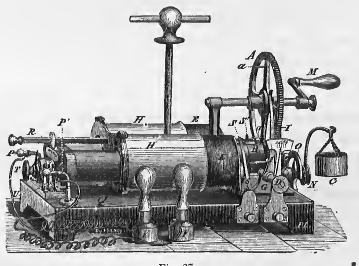


Fig. 27.

appareils que la pratique médicale peut aujourd'hui mettre à l'étude, et qui s'offrent à elle en foule dans des conditions à peu près égales.

Cet appareil que l'auteur appelle *magnéto-faradique* est représenté par la figure 27;

(1) A. Becquerel, *Traité des applications de l'électricité à la thérapeutique*, 2e édition, Paris, Germer Baillière, 1860.

nous n'entrerons pas dans le détail de toutes les pièces qui le composent, nous renverrons pour ce sujet, à la description qu'en donne M. Duchenne dans son ouvrage (1). Nous en esquisserons seulement la description théorique.

C'est un appareil de Page dont l'aimant est fixe, l'armature mobile, les hélices multiples, l'interrupteur simple, double ou quadruple, et où l'intensité des courants peut, toutes choses égales d'ailleurs, être graduée par deux chemises de cuivre.

L'aimant est formé de deux branches cylindriques parallèles, reliées entre elles au moyen d'une traverse de fer doux par celle de leurs extrémités qui est opposée à l'armature ; il est complétement fixe.

L'armature est une masse de fer doux pouvant faire, au maximum, 16 tours par seconde, ce qui produit 32 intermittences d'aimantation, et par conséquent 64 courants induits pendant le même temps.

Cette armature peut être rapprochée ou éloignée des pôles de l'aimant au moyen d'une vis de réglage N portant un indicateur qui se meut devant un cadran divisé. Quand l'appareil n'est pas en fonction, on peut, au moyen d'un levier agissant sur la tête de cette vis, exercer sur l'armature une traction qui est mesurée par des poids dont on charge un petit vase C. Cette complication me paraît inutile et d'un effet bien incertain.

Sur chacune des branches de l'aimant est enroulée une première hélice formée de 24 mètres d'un fil de cuivre d'un demi-millimètre de diamètre puis une seconde formée de 600 mètres d'un fil de $\frac{1}{6}$ de millimètre. Les deux gros fils forment un système que nous appellerons avec l'auteur *première hélice,* les fils fins un autre système que nous appellerons *deuxième hélice*. Les extrémités du fil de la première hélice aboutissent aux ressorts *s* et *s'* du rhéotome B ; celles du fil de la deuxième hélice à certaines bornes et au commutateur des hélices U, qui permet de lancer à volonté dans un même conducteur les courants de l'une ou de l'autre des hélices.

En D se trouve une vis que l'auteur appelle le *régulateur des intermittences ;* elle a pour effet de faire basculer un ressort I, de manière à le mettre en contact, tantôt avec deux goupilles *a* portées par la grande roue, tantôt avec la plaque G ; enfin par un ensemble de communications dans le détail desquelles nous ne saurions entrer, on peut produire à volonté, une, deux ou quatre interruptions par tour de l'armature.

Les solutions de continuité qui se font sur le rhéotome n'ont lieu que dans le gros fil enroulé immédiatement sur l'aimant fixe. Le long fil fin (fil de la deuxième hélice) n'a aucune communication avec ce rhéotome.

43. — On peut, à volonté,

1° Recueillir l'extra-courant produit à une, à deux ou à quatre des interruptions

(1) Duchenne, *De l'électrisation localisée*, etc., 2e édition, Paris, J. B. Baillière, 1861.

coïncidant avec les maxima de l'induction magnétique qui se produisent à chaque tour de l'armature de tout appareil de Page. Dans le cas d'une ou de deux interruptions, on a des courants de même sens ; dans le cas de quatre, ils sont alternativement de sens contraires (1) ;

2° Suspendre toute interruption du rhéotome, le circuit de la première hélice restant ouvert ; on n'a alors que des effets insignifiants dans la deuxième hélice ;

3° Suspendre toute interruption du rhéotome, le circuit de la première hélice restant fermé ; le résultat est le même ;

4° Laisser fonctionner le rhéotome de la première hélice, et on recueille alors dans le circuit de la seconde des courants dont les effets seraient, d'après M. Duchenne, notablement différents de ceux de l'extra-courant.

44. — M. Duchenne a attribué les effets particuliers qu'il observe dans sa deuxième hélice, à l'action de courants dont la distribution et l'intensité seraient différentes de celles des courants qui sont induits dans la première hélice. D'autres personnes, au contraire, ont pensé que les deux hélices ne différaient que par la longueur du fil. Je suis porté à croire que ce qui a manqué à l'idée de M. Duchenne c'était d'être étayée par un rayonnement précis, mais qu'elle est cependant en grande partie juste, au moins dans le cas de son appareil magnéto-faradique.

On peut regarder comme avéré que dans tous les appareils magnéto-électriques de petites dimensions les alternatives d'aimantation et de désaimantation ne suffisent pas pour produire des courants capables de donner des commotions, et cela quelle que soit la vitesse des armatures ou des bobines, quelle que soit aussi la longueur du fil des bobines induites; tandis que la rupture du courant vers l'instant où son intensité est maximum en produit d'énergiques. Cela tient simplement à ce que le décroissement d'intensité qui a lieu au moment d'une rupture est beaucoup plus rapide que la plus rapide désaimantation que nous puissions produire par des mouvements de rapprochement ou d'éloignement opérés mécaniquement (2).

---

(1) Les 1[er], 2[e], 3[e] et 4[e] sont inégaux en intensité; les plus forts sont ceux de deux en deux qui correspondent à la variation d'aimantation dans le sens de la désaimantation. C'est là un fait d'expérience générale; il semble que la désaimantation se fasse plus rapidement que l'aimantation.

(2) On peut se demander comment il se fait qu'un extra-courant ne soit pas produit au moment où la bobine de Clarke, par exemple, passe devant un pôle d'aimant, puisqu'à cet instant le courant change brusquement de sens ainsi que nous l'avons dit ci-dessus; et il semble qu'un changement de sens de ce genre doive être bien plus efficace qu'une interruption. Mais c'est que le changement brusque de sens représenté par la courbe n'est qu'une fiction ; en réalité ce changement est relativement rapide mais non brusque, parce que ce ne sont pas des points mathématiques qui passent l'un devant l'autre, les dimensions relativement considérables des bobines et des aimants font que l'action dé-

Cela posé, quand nous interrompons le courant au moment de son maximum, c'est comme si nous interrompions un courant constant, et il se produit un extra-courant dont nous avons déjà donné la courbe plus haut ; nous la reproduisons ici (fig. 29).

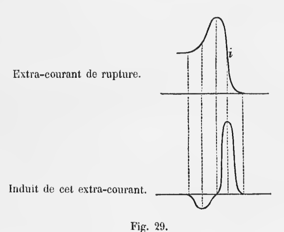


Fig. 29.

Il semblerait que les arcs qui se coupent au point B (fig. 28) sont dans d'excellentes conditions de forme pour donner naissance à des courants induits intenses. Cela est vrai, mais il ne faut pas perdre de vue que l'unité de temps est ici représentée par une longueur très-courte, à tel point que si nous voulions représenter l'intervalle de temps A_0B_0 avec la même unité que nous avons employée par exemple dans la figure 8 pour

---

croît à partir d'un certain moment, pour croître ensuite. Or le décroissement qui s'opère réellement aux environs de B_0, si rapide qu'il soit, est encore très-lent relativement au retour à l'état naturel d'un circuit que l'on interrompt.

La figure 28 montre dans la courbe inférieure quelle doit être la véritable distribution de l'intensité des courants dans une bobine de Clarke.

Représentation approximative du courant induit par le mouvement dans les bobines d'une machine de Clarke.

A_0 B_0 A_f

Représentation plus exacte.

B

Fig 28.

représenter la cessation d'un courant interrompu, il faudrait donner à $A_0 B_0$ une longueur plusieurs centaines de fois plus grande. On voit qu'ainsi étalée la courbe du courant de la bobine n'offrirait qu'une sinuosité insensible par rapport à celle d'un courant de rupture, par exemple.

On comprend facilement d'après cela que la variation mécanique ne puisse donner que des induits peu sensibles par rapport à ceux que fournit l'interruption du courant par rupture du circuit.

Si au contraire on met cet extra-courant en présence d'un circuit sur lequel il puisse agir comme inducteur, il y détermine le courant induit représenté (fig. 29). Sa partie

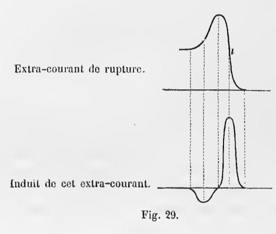


Fig. 29.

négative est peu marquée, mais il n'en est pas de même de sa partie positive; celle-ci pourra posséder une intensité plus grande, et surtout présenter une variation plus brusque que l'extra-courant lui-même, et par conséquent être différenciée de celui-ci par ses effets sur l'organisme.

45. — Cette conclusion est évidemment hors de conteste dans le cas où le circuit de la seconde hélice n'est soumis qu'à l'influence de la première. Mais en doit-il être de même quand la deuxième hélice se trouve comme la première en présence de l'aimant dont les variations d'intensité déterminent l'aimantation ?

Nous commencerons par faire remarquer que la deuxième hélice contenant dans son circuit le corps humain, dont la résistance est très-grande, l'induction due aux variations d'intensité de l'aimant, n'y développe qu'un faible courant; que ce courant n'étant d'ailleurs pas soumis aux interruptions du rhéotome, il n'y aura pas dans ce fil d'extra-courant sensible, de telle sorte que je ne puis voir aucune condition qui puisse apporter un trouble appréciable dans les effets de l'induction opérée sur la deuxième hélice par l'extra-courant de la première.

Telle est, à mon sens, la véritable manière d'envisager les phénomènes dans le cas des appareils magnéto-électriques ; l'effet inducteur de l'extra-courant de la première hélice doit être la cause prédominante de ce qui se passe dans la deuxième.

46. — Maintenant, en est-il de même dans les appareils rhéo-électriques à deux hélices, dont la bobine de Ruhmkorff est le type, et dans lesquels on a l'habitude de considérer la bobine à fil long comme induite directement par le faisceau de fer doux qui se désaimante? A mon avis, le rôle de la première hélice n'est pas seulement d'aimanter le fer doux, et l'extra-courant qui s'y développe au moment de son interruption a une action très-importante sur les effets que l'on constate dans la deuxième. Il me semble que l'action du fer doux doit s'épuiser en partie sur la première hélice comme elle s'épuiserait sur une chemise conductrice; ce qui paraît le prouver, c'est l'influence énorme que produit, sur les effets obtenus dans la seconde hélice, la manière dont s'opère l'interruption du courant aimantant. J'ai reconnu (1) que, pour une force de courant donnée, si l'interruption est trop rapide, les étincelles de tension diminuent; d'un autre côté, elles diminuent aussi si l'interruption est trop lente : rien n'est plus facile avec un peu d'habitude que d'arriver, en faisant l'interruption à la main entre deux fils de platine, à faire cesser à volonté la production des étincelles, par excès de vitesse ou de lenteur de la séparation.

Si, en effet, l'interruption est trop rapide, l'extra-courant n'a pas le temps de passer, il se produit, dans la première hélice, une décharge reflexe qui neutralise son effet sur la seconde. Si, au contraire, la rupture est trop lente, l'arc voltaïque qui se forme entre les deux surfaces laisse passer, avec l'extra-courant, le courant de la pile, de telle sorte que la loi de diminution du courant de la première hélice n'accuse plus une diminution aussi rapide; le courant primitif n'éprouve pas une cessation brusque, mais une diminution d'intensité qui se trouve réglée par l'accroissement de résistance de l'étincelle à mesure que les deux conducteurs s'écartent. L'intensité de l'induction, dans la deuxième hélice, dépend de la chute de l'extra-courant; elle est d'autant plus grande qu'au point d'inflexion i (fig. 29) la tangente à la courbe est plus près d'être perpendiculaire à l'axe des temps.

47. — D'après cela, la véritable condition du succès de l'appareil de Neef, amené à un si haut degré de perfection par M. Ruhmkorff, consisterait dans une certaine congruence de la loi d'accroissement de la résistance de l'étincelle du trembleur pendant son évanouissement avec celles de la désaimantation du fer doux et de la production de l'extra-courant. C'est la seule manière de s'expliquer l'observation que j'ai faite qu'il est impossible (avec des appareils d'une certaine grandeur) d'obtenir des étincelles induites (au moins d'une force déterminée) en produisant l'interruption entre des métaux autres que le platine ; le cuivre, l'argent, le mercure, donnent des résultats d'autant plus mauvais qu'ils sont plus volatils.

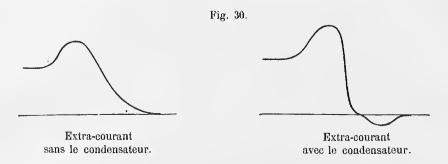
C'est aussi de cette manière que je m'explique l'effet réellement merveilleux du condensateur dont l'emploi a été imaginé par M. Fizeau; en diminuant l'étincelle parce

---

(1) J'ai signalé ces faits sans en rechercher l'explication dans mon mémoire sur la vitesse du son *Annales de chimie et de physique*, 4ᵉ série, t. XII, p. 345.

qu'il donne un écoulement différent à l'électricité de l'extra-courant, il ôte toute incertitude à la loi de sa production, et en même temps il en hâte la fin.

Fig. 30.



Extra-courant sans le condensateur.

Extra-courant avec le condensateur.

Les deux courbes de la figure 30 offrent la représentation de ce que doit être l'extra-courant suivant qu'on emploie ou non le condensateur de M. Fizeau. C'est comme on sait un condensateur à très-grande surface qui est en communication permanente avec les extrémités du fil de l'hélice inductrice. Lorsque le courant est dans son plein établissement ce condensateur est chargé proportionnellement à la tension de la pile employée. Au moment où le circuit commence à être interrompu, le condensateur se décharge à travers la bobine inductrice en donnant un courant du même sens que celui de la pile, ce qui retarde la naissance de l'extra-courant. Pendant ce temps l'interrupteur a fait du chemin, l'étincelle est arrivée à sa période d'évanouissement, le courant de la pile est donc anéanti ; mais l'extra-courant trouve cependant à s'écouler : il est en partie neutralisé par la décharge inverse du condensateur ce qui précipite sa chute ; bientôt il arrive même à charger le condensateur, passe par zéro et présente une période négative correspondant à la décharge inverse de ce condensateur. Cette décharge inverse peut ainsi que le fait remarquer M. Jamin contribuer à anéantir plus rapidement l'aimantation du fer doux, ce qui est encore une circonstance favorable.

Comme on le voit, mon explication se fonde surtout sur la loi de décroissement de l'extra-courant ; celui-ci devant tomber plus rapidement quand on utilise le condensateur de M. Fizeau induit alors dans la seconde hélice un courant d'intensité maxima plus considérable, et par conséquent d'une plus grande tension.

Il ne faut pas croire d'ailleurs que l'on puisse vraisemblablement séparer l'action inductrice de l'extra-courant de celle de la désaimantation, ces deux ordres de phénomènes doivent marcher ensemble, au moins pour un fer doux dont la force coërcitive soit négligeable, ce qui paraît être le cas des paquets de fils employés par les constructeurs dans les bobines d'induction ; il est bien évident aussi qu'en précipitant le décroissement de l'extra-courant on doit précipiter aussi la désaimantation, car l'extra-courant est lui-même une cause d'aimantation.

En résumé, il me paraît rationnel de rechercher surtout dans la distribution de l'extra-courant, l'explication des effets produits dans la deuxième hélice de tous les appareils de ce genre.

B.

Des appareils rhéo-électriques.

48. — Tandis que dans les appareils magnéto-électriques on dépensait de la force mécanique, dans ceux-ci on dépense de l'électricité, laquelle est fournie par une pile. Mais les deux sortes d'appareils rentrent en réalité dans un type commun, car dans les uns comme dans les autres on n'a d'autre but, soit par le mouvement, soit par une pile, que de se procurer un courant initial dont la rupture détermine ensuite un extra-courant que l'on utilise soit directement soit par la production d'un induit dans un circuit voisin. Dans les uns comme dans les autres l'action est considérablement renforcée par la présence d'un fer doux dans l'hélice inductrice.

L'induction ne pouvant prendre naissance que par suite de l'état variable d'une certaine influence électro-dynamique ou électro-magnétique, il doit nécessairement entrer dans les appareils où le courant fourni par une pile est la source des effets d'induction, un organe spécialement destiné à produire les alternatives d'action de ce courant : c'est *l'interrupteur*, ou *rhéotome* comme on l'appelle aussi.

Le mode d'interruption diffère suivant que l'on veut produire des interruptions très-rapides ou au contraire très-lentes, régulièrement espacées ou non. Nous décrirons tout à l'heure les interrupteurs adoptés dans les appareils électro-médicaux dont il sera question ci-après ; la critique que l'on pourrait adresser à la plupart c'est qu'ils offrent généralement le moyen de produire des interruptions très-rares ou au contraire très-rapides, et ne permettent pas de passer par des vitesses moyennes. Dans le plus grand nombre en effet, les interruptions lentes se font directement à la main, ce qui permet à peine d'en faire deux par seconde, tandis que les interruptions vives qui sont automatiques se répètent au moins une vingtaine de fois par seconde. Il est cependant des appareils qui permettent de mieux graduer les interruptions ; nous aurons soin de faire ressortir pour chacun d'eux la réalisation plus ou moins parfaite de cette condition.

Nous ferons remarquer aussi à propos des interruptions rares qu'il y a à distinguer entre les interruptions tout à fait isolées et les groupes plus ou moins espacés d'interruptions très-voisines. Dans certains des appareils que nous décrirons ci-après, les interruptions rares se font par un organe spécial, et on n'a à chaque fois qu'une commotion parfaitement isolée ; dans d'autres au contraire, c'est par l'intermédiaire du trembleur lui-même que se fait l'interruption, et, pour n'avoir qu'une commotion, il faudrait que ce courant ne fût maintenu que pendant un temps plus court que la durée d'une vibration du trembleur. C'est là une condition difficile à remplir, et lors-

6

qu'on emploie des courants très-forts, c'est un grave inconvénient que d'être exposé à produire par quelque fausse manœuvre une série plus ou moins nombreuse de commotions au lieu de quelques-unes complétement isolées.

Les appareils magnéto-électriques semblent, au premier abord, permettre de graduer à volonté la fréquence des interruptions, puisque celle-ci est intimement liée à la rapidité du mouvement de la manivelle; il n'est pas inutile de faire remarquer qu'ils ne réalisent cependant pas les conditions les plus convenables pour faire varier la fréquence des interruptions en conservant une même intensité d'action. Il arrive en effet que lorsqu'on diminue la vitesse de rotation, non-seulement on diminue le nombre d'interruptions qui se produisent dans l'unité de temps, mais encore on fait décroître aussi l'intensité des effets, puisqu'on rend plus lent le mouvement qui détermine les variations de l'aimantation. Pour conserver l'intensité constante tout en faisant varier le nombre des intermittences par la vitesse de rotation, il faudrait donc avoir soin de rapprocher les armatures à mesure que celle-ci diminue, et cela suivant une certaine loi qu'il resterait à rechercher. Il est vrai de dire que la pratique médicale ne paraît pas, jusqu'à présent, s'être beaucoup préoccupée de cette condition.

En résumé, les appareils rhéo-électriques l'emportent donc sur les appareils magnéto-électriques, en ce que l'on y peut faire varier la fréquence des intermittences indépendamment de l'intensité, et aussi en ce que dans le plus grand nombre des cas les interrupteurs étant automatiques, on peut soutenir les effets un temps assez long sans l'intervention directe de l'opérateur; avantage qui compense bien l'incommodité qui résulte de la préparation d'une pile. Au reste, les efforts des constructeurs tendent précisément à donner aux appareils rhéo-électriques le caractère d'instantanéité de mise en action dont jouissent des appareils magnéto-électriques, et cela par la disposition de piles dont la préparation n'exige aucuns soins immédiats : nous en verrons des exemples. Il est vrai de dire aussi qu'il semble que rien ne puisse, au point de vue de la commodité, l'emporter sur les appareils magnéto-électriques, toutes les fois que l'on veut employer l'électricité plutôt comme moyen d'exploration que comme agent curatif.

49. — Les interrupteurs séparés dont on peut faire usage, sont les suivants :

1° La roue interruptrice de Pouillet, formée d'une roue métallique portant des dents entre lesquelles sont incrustées des portions de matières isolantes, ou celle de Masson qui est une roue de verre, sur laquelle est enroulé un anneau métallique, présentant des solutions de continuité sur la moitié de sa largeur. Deux ressorts établissent la communication, l'un avec la partie métallique continue, l'autre avec la partie discontinue.

On peut faire mouvoir ces roues, soit à la main, soit par un mouvement d'horlogerie.

2° Une sorte d'étoile métallique à rayons très-aigus et très-espacés qui viennent

plonger successivement dans une petite coupe remplie de mercure; on met ordinairement en mouvement ce système par un rouage d'horlogerie. Malheureusement, ces communications par le mercure ne présentent pas de sûreté à cause de l'oxydation de ce métal par l'effet des étincelles, de telle sorte que sa surface se couvre rapidement d'impuretés qui finissent par empêcher la communication.

3° Pour obtenir des interruptions notablement espacées, Fabré Palaprat se servait du métronome des musiciens, auquel il adaptait un petit doigt métallique plongeant à chaque oscillation dans un godet rempli de mercure.

4° On peut employer le pendule, à l'exemple des horloges électriques, pour distribuer ou interrompre le courant. M. Duchenne a fait réaliser par M. Mathieu une horloge qui interrompt à volonté le courant une, deux, trois ou quatre fois par seconde.

5° De petits appareils d'horlogerie portatifs, tels que ceux de M. Pulvermacher, remplissent le même but et permettent d'augmenter la fréquence des interruptions.

6° Les interrupteurs automatiques qui sont ceux où le courant détermine lui-même son interruption.

Le principe le plus fécond qui ait été utilisé dans leur construction est celui de l'interrupteur de Neef, qu'on appelle aussi quelquefois *trembleur*.

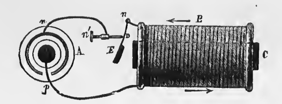


Fig. 31.

Soit (fig. 31) A la pile dont le courant traverse l'hélice B et vient passer par un levier D; celui-ci par l'effet d'une force quelconque (son élasticité, sa pesanteur ou un ressort auxiliaire), se trouve maintenu en contact avec l'extrémité d'une vis n' qui sert à fermer le circuit. A l'extrémité du levier D, est une petite masse de fer doux E; dans la bobine est un cylindre C de la même matière. Au moment où le courant passe, l'aimantation imprimée au fer doux de la bobine attire la petite masse E; mais aussitôt le contact est rompu entre D et la pointe de la vis n', le courant est interrompu, la force attractive cesse aussi, le levier D revient prendre sa position initiale et ainsi de suite.

La rapidité de ces alternatives est réglée par le moment d'inertie de la masse E et en général du système mobile, par sa distance au fer de la bobine et par la force antago-

niste qui tend à rappeler le levier ; dans les divers appareils que nous aurons occasion de citer, on a mis à profit ces diverses circonstances ; dans les uns, on fait varier la distance en allongeant ou raccourcissant la vis n' ; dans d'autres, la longueur du levier D qui agit comme ressort, et qui est, par conséquent, d'autant plus énergique qu'il est plus court ; dans d'autres encore, on a une masse auxiliaire que l'on déplace à volonté sur le prolongement du levier D.

50. — Les interrupteurs attenants aux appareils sont tous fondés sur les principes dont il vient d'être question ; nous en décrirons quelques-uns d'une manière spéciale.

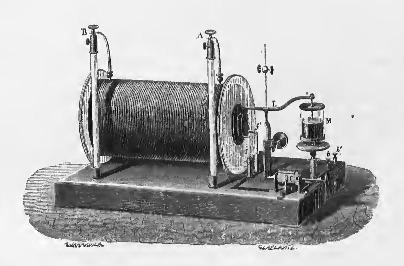


Fig. 32.

Interrupteur de Foucault. — Parmi les interrupteurs dérivés du trembleur de Neef nous devons signaler l'interrupteur disposé par Foucault pour les grosses bobines de M. Ruhmkorff ; il possède la faculté précieuse de pouvoir se régler depuis une extrême lenteur jusqu'à une grande vitesse. Voici en quoi il consiste : une sorte de balancier horizontal L (fig. 32) porte à l'une de ses extrémités une petite masse de fer doux attirée par le fer central de l'hélice inductrice, et à l'autre une pointe de platine plongeant d'une petite quantité dans un verre qui contient un amalgame de platine recouvert d'une couche d'alcool ; ce balancier est supporté par une lame verticale flexible prolongée à sa partie supérieure par une tige le long de laquelle on peut faire glisser une petite masse qui règle la rapidité des oscillations du système. Une crémaillère peut faire monter ou descendre le tout, de manière à faire varier la distance du petit contact au fer central de l'hélice. Le godet qui contient l'amalgame est lui-même porté sur un support à crémaillère qui permet d'y faire plonger la tige de platine à différentes

profondeurs. Ces trois éléments permettent de faire varier, entre des limites très-éloignées, la fréquence des interruptions.

La figure 32 représente un interrupteur de Foucault adapté à une grosse bobine de Ruhmkorff, mais il s'en construit de séparés dans lesquels même on utilise pour produire l'oscillation un courant distinct de celui qu'on veut rendre intermittent; de cette façon le courant moteur peut conserver une intensité constante, tandis que le courant actif passe par toutes les intensités désirables sans troubler le rhythme de l'interrupteur.

51. — *Trembleur de M. Trouvé.* — Nous donnons ci-contre la figure du trembleur de M. Trouvé; il est remarquable par l'habileté avec laquelle son auteur a su en faire tenir toutes les pièces dans un espace très-restreint. La pièce A (fig. 33) est un contact de fer doux articulé à l'une de ses extrémités, il est soulevé à l'autre par un petit ressort en platine; la longueur active de celui-ci est réglée par une goupille entraînée par

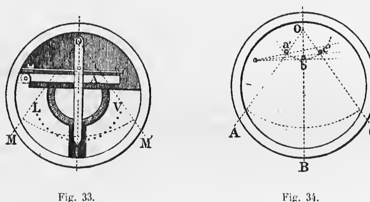


Fig. 33. Fig. 34.

un levier, articulé en O, et qui peut prendre les deux positions OM et OM' correspondant à L (lentement) et V (vite). On voit facilement, en effet, à l'inspection de la figure 34, que l'excursion du contact est d'autant plus grande, et par conséquent les oscillations d'autant plus lentes que le levier de réglage est plus dévié vers la gauche. Dans cet appareil le courant passe par la goupille et par la petite lame de platine faisant fonctions de ressort.

52. — *Interrupteur de M. Duchenne.* — La nécessité de disposer, d'une façon absolue, du nombre des interruptions a été bien sentie par M. Duchenne, qui a eu soin de munir son appareil *volta-faradique* d'un trembleur dont les battements peuvent être ralentis ou accélérés à volonté; ainsi il peut ne donner que quatre intermittences par seconde, ou bien en produire un nombre extrêmement considérable dans le même temps, en passant par tous les degrés de vitesse intermédiaires.

Voici la figure de ce trembleur (fig. 35) que nous empruntons, ainsi que sa description presque textuelle, au traité de M. Duchenne (1). Les extrémités du fil de la première hélice communiquent, l'une avec le bouton E, l'autre avec la vis C ; la pièce mobile de cuivre A, qui est repoussée contre la vis C par un ressort placé au devant d'elle, communique avec le bouton F. On comprend qu'à l'instant où les boutons E et F sont mis en rapport avec les pôles d'une pile, le courant passe dans le fil de la première hélice, et aimante le fer doux central de celle-ci, qui attire alors le fer doux mobile G. Ce fer doux entraîne avec lui la pièce mobile de cuivre A qui était appliquée contre la vis C. Il en résulte une solution de continuité, et conséquemment la cessation de l'aimantation et le retour de la pièce A contre la vis C. Alors le courant passe de nouveau dans l'hélice, produit les phénomènes ci-dessus décrits, et ainsi de suite.

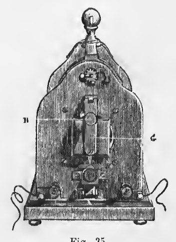


Fig. 35.

Le fer doux mobile G est assez éloigné du fer doux placé au centre de l'hélice pour avoir une course notable à parcourir quand il est attiré par l'aimant temporaire de la première hélice. Dans cet état, il ne bat que quatre fois par seconde. Mais en tournant graduellement de droite à gauche la vis C, l'étendue de la course du fer mobile G diminue de plus en plus ; conséquemment la rapidité du trembleur croît progressivement au gré de l'opérateur. Pour que l'action magnétique pût s'exercer avec assez de force à de grandes distances entre l'aimant temporaire de l'hélice et le fer doux mobile G, M. Duchenne a augmenté la masse de ce dernier en l'articulant avec un barreau de fer doux de 14 centimètres de longueur qui s'étend sur la face supérieure de la bobine.

53. — M. Duchenne établit une distinction entre les trembleurs *avec* ou *sans vibrations*. Les trembleurs à vibrations sont ceux qui entre chaque intermittence sont agités par plusieurs ressauts et rebondissements très-rapides qui rendent l'électrisation très-désagréable. Sauf certains cas particuliers, on doit éviter les dispositions de trembleurs donnant lieu à ces effets, car elles rendent plus difficiles certaines expériences électro-musculaires.

On sait que les secousses électriques très-rapprochées déterminent au lieu de commotions isolées un état tétanique ; des vibrations se produisant dans le trembleur donnent donc lieu en réalité à des séries plus ou moins courtes et plus ou moins espacées de convulsions tétaniques.

---

(1) Duchenne, *Traité de l'électrisation localisée*, 2e édition, Paris, J. B. Baillière, 1861.

54. — Des faits d'ordre purement physique que j'ai observés viennent à l'appui de ceux d'ordre physiologique cités par M. Duchenne. J'ai eu en effet l'occasion de reconnaître que la manière dont s'opère la rupture de l'extra-courant peut donner lieu à une division de l'étincelle induite dont le fait suivant pourra donner une idée. Dans des expériences relatives à la vitesse du son (1) je me servais comme moyen chronoscopique de la trace laissée sur une plaque d'argent iodurée par une étincelle d'induction provenant d'une bobine de Ruhmkorff. L'interruption du courant inducteur était produite mécaniquement ; or, dans certaines circonstances, au lieu d'une trace unique j'ai observé jusqu'à 15 traces, correspondant à autant de petites étincelles dans lesquelles s'était subdivisée une seule décharge. On pouvait les distinguer les unes des autres parce que la plaque était animée d'un mouvement rapide, et que les petites étincelles étant successives laissaient leur trace en des points différents ; or ces quinze traces étaient réparties sur une longueur de 1 millimètre, correspondant à un temps notablement inférieur à $\frac{1}{50000}$ de seconde. Ces étincelles étaient d'ailleurs certainement successives car elles s'alignaient toutes dans le sens du mouvement de la plaque.

Il n'y a pas lieu de croire que chacune de ces étincelles partielles correspondît à une vibration produite dans l'interrupteur, mais il est manifeste que suivant la loi du mouvement de l'interruption, la décharge induite qui se manifeste le plus ordinairement par une seule étincelle peut se diviser en un certain nombre de décharges partielles. Ces phénomènes ont été observés avec une bobine de Ruhmkorff de moyen modèle.

55. — *Des moyens de graduation.* — Il en existe un grand nombre, mais il ne faut pas croire qu'ils soient tous physiquement équivalents, car ce n'est pas seulement l'intensité absolue des effets qu'ils font varier, la plupart modifient en même temps la loi des décharges, et on ne peut dire à priori que cette circonstance soit insignifiante, quoique jusques à présent aucun fait n'ait été signalé qui manifeste d'une manière irrécusable son influence sur l'organisme ; le physicien doit cependant en prévoir la possibilité.

1° Variation d'intensité du courant inducteur. — Il n'y a qu'un très-petit nombre d'appareils où ce mode de graduation soit mis à la disposition de l'opérateur ; il est cependant d'autant plus précieux que c'est sans doute celui qui doit le moins influer sur le mécanisme des décharges.

2° Introduction d'une plus ou moins grande masse de fer doux dans la bobine inductrice. — Ce moyen imité des expériences faites par M. Dove avec son inducteur différentiel est employé dans quelques appareils où l'on varie le nombre des fils de fer qu'on place dans les bobines, mais il est peu employé à cause de son incommodité.

---

(1) *Détermination expérimentale de la vitesse de propagation d'un ébranlement sonore dans un tuyau cylindrique*, Annales de Chimie et de Physique, 4e série, tome XII, page 345.

3° Introduction d'une longueur plus ou moins grande de l'hélice inductrice dans l'hélice induite. — Ce moyen est le plus parfait de tous. M. Duchenne en attribue l'invention au docteur Rognetta ; il a été adopté par M. Duboys-Reymond (de Berlin) dans l'appareil plus connu sous le nom de Siemens et Halske, etc. La critique que M. Duchenne fait de ce système au point de vue de la soi-disant nécessité de contacts mobiles n'est pas fondée.

4° Introduction d'une résistance variable dans le circuit induit ; on emploie souvent dans ce but une colonne d'eau de longueur variable.

5° Affaiblissement des courants induits par l'influence d'une masse métallique continue placée dans le voisinage. — Nous avons analysé plus haut cette influence mise en évidence par M. Dove, et dont M. Duchenne paraît avoir introduit l'usage dans la construction des appareils électro-médicaux. On emploie à cet effet un tube de cuivre mobile dans le sens de son axe de manière à recouvrir plus ou moins la bobine induite ou la bobine inductrice, ou même simplement le fer doux placé dans l'intérieur de celle-ci.

6° Utilisation d'une longueur plus ou moins grande du circuit induit. — Ce moyen de graduation permet de fractionner les effets suivant deux ou trois rapports seulement ; il n'est pas fréquemment employé. On en a un exemple dans l'appareil de M. Trouvé.

56. — *Des divers types d'appareils au point de vue de l'utilisation des courants.* — Reprenons la figure schématique d'un appareil formé d'une pile et d'une bobine inductrice renfermant un noyau de fer doux.

Si le corps humain se trouve placé (fig. 36) dans un circuit n'' PN (dans la partie re-

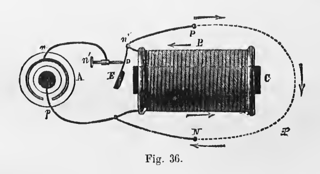


Fig. 36.

présentée en traits interrompus), il est facile de voir que pendant tout le temps que le circuit de la pile est fermé par l'interrupteur, une très-faible portion seulement du courant de cette pile passe dans le circuit dérivé qui contient le corps humain, car la résistance de celui-ci est très-grande par rapport à celle de la bobine. Mais quand le circuit de la pile est interrompu en D par l'effet du mouvement du trembleur, l'extra-courant, trouvant dans l'étincelle une résistance qui devient bientôt beaucoup plus considérable que celle du corps humain, passe en grande partie par le circuit n'' PN.

L'extra-courant direct ou de rupture est d'ailleurs le seul sensible ; nous savons en effet qu'il a beaucoup plus de tension que l'inverse ou d'établissement, et que sa durée est notablement moindre, circonstances toutes deux favorables à la production de l'effet physiologique douloureux que l'on paraît rechercher.

57. — On ne construit plus aujourd'hui d'appareil qui n'utilise que l'extra-courant. Tous ceux en usage comportent une seconde hélice d'un fil beaucoup plus fin et beaucoup plus long que celui qui forme la première; c'est l'hélice induite proprement dite ou deuxième hélice. On peut à volonté recueillir soit l'extra-courant en plaçant le corps (fig. 37) dans le circuit PN, soit le courant induit en le plaçant dans le circuit P′N′

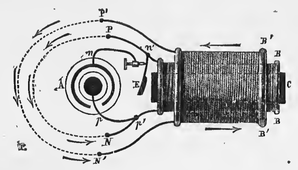


Fig. 37.

qui ferme la deuxième hélice. L'induit de rupture, qui est de même sens que l'extra-courant, est pour les mêmes raisons que ci-dessus le seul perceptible ; cependant l'induit inverse agit sans doute en prédisposant le trajet qu'il parcourt dans le corps à ressentir plus vivement l'induit direct qui lui succède.

58. — Un certain nombre de constructeurs établissent une communication permanente entre une des extrémités du fil de la première hélice et une extrémité du fil de la seconde (sur la figure 38 entre P′ et N) en ayant soin d'observer la condition que les

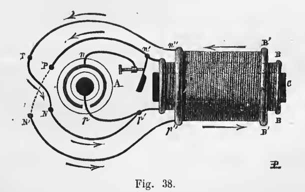


Fig. 38.

courants marchent dans le même sens de façon à s'ajouter ; cela revient à mettre le fil gros et le fil fin l'un au bout de l'autre.

Dans cette disposition, en attachant les conducteurs manipules
en P et en N on a l'extra-courant,
en P′ et N′ le courant induit;
en P et N′ la superposition des deux courants.

La pratique montre que cette dernière combinaison l'emporte sur chacune des deux premières. Il me paraît probable que dans ce cas ce n'est pas précisément par l'addition des deux sortes de courant que le renforcement a lieu, mais sans doute en permettant à l'extra-courant de se décharger plus rapidement et plus complétement que lorsque le circuit est simplement interrompu, de telle sorte que l'effet serait en partie analogue à celui que produit le condensateur de M. Fizeau.

DESCRIPTION DE DIVERS APPAREILS ÉLECTRO-MÉDICAUX.

Bobine d'induction de M. Ruhmkorff.

59. — Dans les cas, qui sont du reste assez rares, où l'on a besoin d'étincelles d'une forte tension, on ne saurait trouver mieux que l'appareil qui a conquis à M. Ruhmkorff une célébrité si méritée. Nous donnons ici la figure d'un petit modèle (fig. 39) qui produit

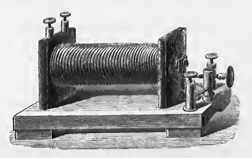


Fig. 39.

des étincelles de 1 à 10 millimètres, lesquelles peuvent être supportées lorsqu'elles ne se succèdent pas trop rapidement. Ces bobines à tension relativement forte peuvent remplacer l'électricité des machines ordinaires à frottement, surtout lorsqu'elles sont munies d'un interrupteur donnant à la volonté de l'opérateur des décharges isolées les unes des autres.

Appareil pour le service des hôpitaux, par M. Ruhmkorff.

60. — M. Ruhmkorff a disposé récemment un appareil transportable, spécialement destiné à la pratique des hôpitaux, et dans lequel sont réunies les conditions les plus essentielles pour assurer la régularité de l'emploi des courants d'induction. Cet appareil

est représenté ci-contre (fig. 40). Il contient deux éléments zinc-charbon et bisulfate de mercure; le zinc peut être immergé plus ou moins dans le liquide, ce qui permet

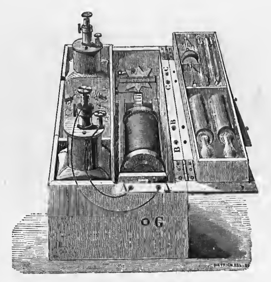


Fig. 40.

de graduer l'effet inducteur. Un seul des éléments suffit dans les cas ordinaires; le second est surtout un élément de rechange. Le mode de graduation est l'enfoncement des deux hélices l'une dans l'autre, ce qui permet de réduire l'effet presque à zéro, s'il en est besoin. Le trembleur est celui de Neef; la fréquence des interruptions se règle au moyen d'une vis. Une étoile mue par une petite manivelle dont dispose l'opérateur permet de produire des effets intermittents.

Cet appareil donne à volonté l'extra-courant et l'induit du premier ordre.

Appareil portatif par M. Ruhmkorff.

61. — Ce constructeur fabrique depuis longtemps un appareil portatif spécialement destiné à la pratique civile, et qui est d'un beaucoup plus petit volume que le précédent. Il contient deux éléments zinc-charbon et bisulfate de mercure; ces éléments sont très-simples : ce sont de petits godets en charbon des cornues à gaz dans lesquels plongent des disques épais de zinc. Le montage de cette pile est très-facile, et ses effets durent assez longtemps pour la plupart des applications. Il faut, il est vrai, monter et démonter la pile à chaque fois.

Il y a deux bobines qui fonctionnent identiquement de la même manière; c'est une même bobine coupée en deux. Le graduateur est une chemise en cuivre extérieure aux bobines.

L'interrupteur est le trembleur de Neef; une étoile placée extérieurement à la boîte permet de produire les intermittences.

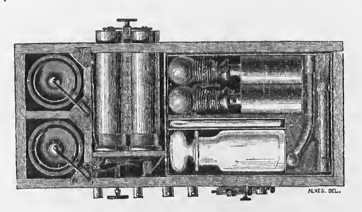


Fig. 41.

Cet appareil donne à volonté l'extra-courant et le courant induit.
Il est représenté ci-contre (fig. 41) au tiers de la grandeur naturelle.

Appareil de M. le docteur Tripier.

62. — C'est un appareil non portatif à pile indépendante. Nous en empruntons la figure et une partie de la description au traité de cet auteur (1).

Dans cette figure, le circuit inducteur est celui de la bobine à fil fin, B; le commutateur C et la manette D sont disposés de manière à y amener le courant de la pile dont les électrodes aboutissent en a et a'. Des rhéophores insérés sur les extrémités polaires du circuit B permettent de recueillir par deux manipules les extra-courants de haute tension développés dans le circuit. Les rhéophores attachés à la bobine B' conduisent chacun à l'une des branches d'une pince à expérience et donnent des courants induits de faible tension.

Voici d'après M. Tripier les divers effets qui peuvent s'obtenir par la combinaison des divers organes de son appareil :

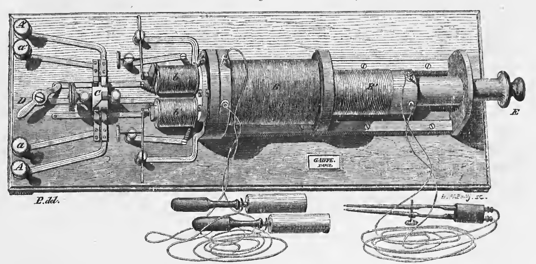
« Les trois cylindres étant superposés et le courant de la pile traversant l'hélice du
« fil gros et court, on obtient (1°) les extra-courants de ce fil, (2°) les courants induits
« du fil fin. Dans ces deux cas, les actions inductrices réciproques des deux circuits
« s'ajoutent à celle du faisceau de fer doux agissant comme électro-aimant.

---

(1) *Manuel d'électrothérapie*, par le docteur A. Tripier. Paris, J. B. Baillière, 1861.
Je dois la figure 42 à l'obligeance de M. Tripier.

« Les trois cylindres étant toujours superposés et e courant de la pile traversant « l'hélice du fil long et fin, on a 3° les extra-courants de grande tension de ce fil, et (4°)

Fig. 42.



A, A', bornes destinées à recevoir les électrodes de l'une des piles; — *a*, *a'*, bornes recevant les électrodes de l'autre pile. — B, bobine sur laquelle est enroulé le fil fin; — *b*, petite bobine à fil fin contenant dans son intérieur l'électro-aimant qui règle les interruptions du circuit de la bobine précédente. — B', bobine sur laquelle est enroulé le gros fil; — *b'*, petite bobine à gros fil, contenant l'électro-aimant qui règle les interruptions du circuit de la bobine B' quand ce dernier circuit est parcouru par le courant de la pile. — E, tête de la tige qui continue l'électro-aimant central et lui sert de manche. — C, commutateur. — D, manette mettant l'appareil en communication avec l'une ou l'autre des piles.

« des courants induits de faible tension développés dans le gros fil. Dans ce cas en- « core les actions réciproques des deux bobines s'ajoutent à celle de l'électro-aimant.

« La bobine à fil gros et court étant seule retirée, et le courant de la pile étant « dirigé à travers la bobine à fil fin, on obtient (5°) les extra-courants de haute ten- « sion du fil fin, avec conservation de l'influence de l'électro-aimant et suppression « de l'action inductrice de la bobine à gros fil.

« La bobine à fil fin étant seule retirée, et le courant de la pile traversant la bobine « à gros fil, on a (6°) les extra-courants de faible tension de celle-ci avec conservation « de l'action inductrice de l'électro-aimant et suppression de celle de la bobine à « fil fin.

« Le faisceau central de fer doux étant seul retiré, on obtient (7° et 8°) des extra- « courants d'origine exclusivement voltaïque dans le fil fin ou dans le gros fil suivant « que l'un ou l'autre est traversé par le courant de la pile ; — en même temps que « (9° et 10°) les courants d'induction voltaïque du gros fil et du fil fin dans les mêmes « circonstances.

« Enfin, lorsqu'une bobine et le faisceau de fer doux sont retirés, on a les extra-

« courants produits par la rupture du courant de la pile, extra-courants de haute ten-
« sion (11°), si la bobine conservée est celle à fil long et fin, et (12°) de faible tension
« si l'on a gardé seulement la bobine à fil gros et court. »

63. — La tentative de M. Tripier est certainement louable, et il y a le plus grand intérêt à pouvoir comparer les effets produits dans des circonstances bien différentes et surtout bien déterminées. Mais nous ne croyons pas qu'il soit prudent de chercher les moyens de cette étude comparative dans un appareil complexe, où l'échafaudage de divers organes les uns sur les autres vient créer des conditions multiples auxquelles il est difficile d'avoir égard, telles que des différences de distance, d'intensité, etc. Du moment qu'il s'agit d'expériences de cabinet, il devient beaucoup plus simple, tout à fait rigoureux et presque aussi économique d'avoir un certain nombre de bobines dans lesquelles une seule condition varie de l'une à l'autre, toutes desservies par un seul interrupteur dans lequel le courant moteur soit indépendant du courant actif, comme cela a lieu dans certains modèles de l'interrupteur de Foucault.

Appareil de Dubois-Reymond, ou de Siemens et Halske.

64. — Le courant de la pile arrive (fig. 43) par les deux bornes A et A′, traverse l'électro-aimant D et la bobine inductrice B ; les pièces E, *r*, *a* constituent un trembleur de Neef. On peut recueillir l'extra-courant.

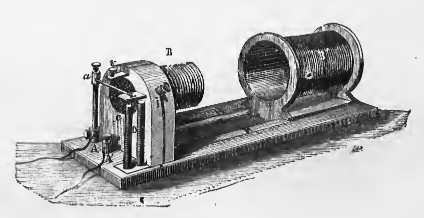


Fig. 43.

Une seconde bobine B′ recouverte d'un fil fin peut recouvrir complétement la première ou s'en éloigner à une assez grande distance ; elle est le siége de l'induit.

La bobine inductrice renferme des fils de fer doux dont on peut faire varier le nombre pour graduer encore d'une autre manière les effets.

Cet appareil est très-simple et très-bien conçu au point de vue de l'expérimentation en ce qui regarde la graduation des courants induits.

Appareils de M. le docteur Duchenne.

65. — On doit reconnaître que M. Duchenne a été, sinon toujours l'inventeur, au moins le promoteur du plus grand nombre des perfectionnements apportés aux appareils d'induction destinés aux usages médicaux. On pourrait être tenté de lui reprocher de ne pas accepter assez vite les perfectionnements apportés chaque jour par les progrès de l'art de la construction, mais il faut bien reconnaître que pour l'expérimentateur qui cherche à établir entre les phénomènes observés des comparaisons souvent fugaces, la prudence oblige à changer le moins possible les conditions de l'instrument explorateur.

Quant à moi, si j'avais le droit de formuler une opinion, je trouverais les grands appareils de M. Duchenne peut-être un peu trop riches en effets multiples pour qu'on puisse facilement s'y reconnaître avant de les avoir longtemps pratiqués, et les conditions variables assez difficiles à démêler les unes des autres pour qu'il soit difficile de donner aux résultats de sa pratique individuelle une valeur absolue et indépendante de l'appareil qui a servi à les obtenir.

Nous décrirons les deux derniers modèles adoptés par l'auteur, l'un est un appareil de cabinet, l'autre est portatif.

66. — *Grand appareil volta-faradique découvert.*— Les hélices superposées constituant le système d'induction se composent de deux fils de cuivre rouge, différant en diamètre et en longueur, et recouverts par de la soie.

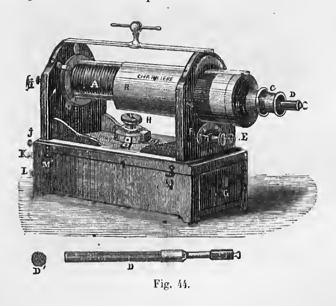


Fig. 44.

Le fil de cuivre le plus gros ($\frac{1}{2}$ millimètre de diamètre) et le plus court (100 mètres de longueur) est enroulé sur une botte de fils de fer doux. Les extrémités de ce fil aboutissent à la pile.

Le fil le plus fin ($\frac{1}{10}$ de millimètre de diamètre) et le plus long (1 000 mètres) est enroulé sur le fil précédent. Les extrémités se rendent aux deux ressorts du commutateur des hélices. Cet organe, que l'on voit en E, est destiné à faire passer rapidement et alternativement le courant de l'une ou de l'autre des hélices dans les conducteurs qui portent l'électricité sur le sujet en expérience.

Il y a deux tubés graduateurs : l'un B qui agit sur la deuxième hélice, et l'autre C sur la première.

Le fer doux D est mobile, on peut même le retirer complétement. D′ représente sa section.

Le trembleur est celui que nous avons décrit plus haut (page 46).

Outre le commutateur des hélices E, il y a un commutateur des piles H qui permet de changer rapidement la direction des courants sans déplacer les rhéophores.

A ces parties principales, M. Duchenne joint un modérateur à eau, une pédale destinée à faire avec le pied les intermittences éloignées, et une boussole pour mesurer l'intensité du courant. Cette boussole doit être très-éloignée de l'appareil afin que l'aimantation du fer doux ne cause pas de perturbation dans ses indications.

67. — *Appareil portatif.* — M. Duchenne lui a donné la forme d'un volume in-8; il se compose (fig. 45) : d'une bobine longue de 6 centimètres, formée par deux hélices

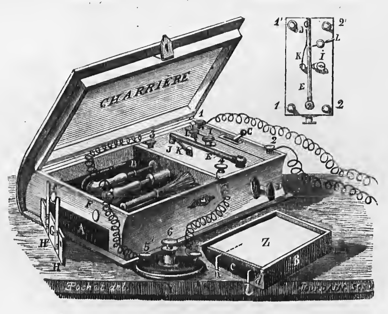


Fig. 45.

superposées, l'une à fil gros ($\frac{1}{2}$ millimètre de diamètre) et court (60 mètres), l'autre à fil fin ($\frac{1}{2}$ de millimètre de diamètre) et long (300 mètres); d'un fer doux constitué

par une plaque de fer-blanc roulée en hélice et placée dans l'axe de la bobine (1) ; d'un tube graduateur D ; d'un commutateur des hélices C ; d'un trembleur E et d'un rhéotome L pour les intermittences lentes.

Un couple au bisulfate de mercure (représenté en Z) se loge dans le compartiment A.

Cet appareil donne à volonté l'extra-courant ou le courant induit.

G est une pédale rhéotome indépendante qu'on emploie dans le cas où l'on veut produire des intermittences isolées ; on la fait mouvoir avec le pied.

M. Duchenne a reconnu que cet appareil était suffisant dans la grande majorité des cas.

Appareil de M. Morin.

68.—Cet appareil a été l'un des premiers qui aient réalisé les conditions de commodité exigées par la pratique civile de l'électro-thérapie, et parmi les plus utiles des dispositions dues à M. Morin il faut compter la solidarité de la pile et de l'appareil d'induc-

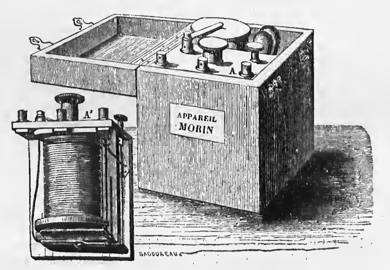


Fig. 46.

tion. La difficulté était d'autant plus grande que ce constructeur s'était imposé la condition d'employer le couple de Bunsen, légèrement modifié il est vrai.

La figure 46 donne la vue d'ensemble de l'appareil de M. Morin. Dans le coin de

(1) L'une des faces de la feuille de fer-blanc est recouverte de papier afin d'isoler les spires les unes des autres.

droite se trouve la pile, à côté les accessoires; A est une planchette sur laquelle est fixé l'appareil d'induction proprement dit ; on voit en A′ ce système à découvert.

Les figures 47 et 48 montrent le système de la bobine : la première en vue extérieure de face, la seconde en coupe. D est un tube de fer-blanc qu'on peut mettre ou

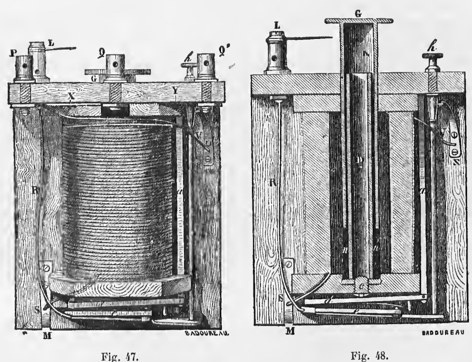


Fig. 47.

Fig. 48.

retirer à volonté ainsi que diverses tiges de fil de fer; G est une chemise mobile de cuivre qui sert de graduateur; vient ensuite le fil fin ou fil induit; le fil gros ou fil inducteur est placé extérieurement. En *e* est une petite masse de fer taraudée dans le bois de la bobine : elle s'aimante sous l'influence du courant et attire le contact *d*; celui-ci est formé par une lame de fer doux articulée à l'extrémité d'une autre lame du même métal *a* placée latéralement à la bobine de manière à s'aimanter sous l'influence du courant inducteur et accroître ainsi l'attraction. Il n'y a pas de ressort antagoniste; c'est la pesanteur qui en remplit l'office. Le contact *d* porte une petite lame de platine qui vient frapper sur une pointe de même métal dont la distance se règle au moyen de la tige terminée par le bouton *h*. Le même bouton, après qu'on lui a fait faire un certain nombre de tours, sert à produire des interruptions espacées au gré de l'opérateur.

En L est un levier mobile et flexible qui sert à établir la communication de la

bobine avec la pile : à cet effet il vient porter sur une tige de platine I fixée dans le charbon de celle-ci.

La pile (fig. 49) se compose d'une enveloppe de cuivre A doublée d'un zinc épais E, puis d'un vase poreux C dans lequel se trouve un charbon de cornues H. On met de l'acide azotique ou du bichromate de potasse en dedans du vase poreux et de l'eau pure en dehors. Un couvercle de gutta-percha B ferme à peu près hermétiquement tout ce système.

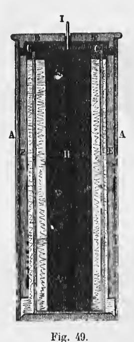


Fig. 49.

Cette pile offre les inconvénients inhérents à l'emploi de l'acide nitrique, mais elle a l'avantage de donner une quantité notable d'électricité, de pouvoir être montée à l'avance, rester plusieurs heures en action et enfin être démontée à loisir, tandis que les petites piles à bisulfate de mercure doivent être préparées au chevet du malade.

L'appareil de M. Morin peut être regardé comme disposé de manière à donner des courants où la quantité est un des éléments de la question, tandis que dans les petits appareils portatifs c'est surtout vers la *tension* que se portent les efforts des constructeurs, dans le but d'atteindre la limite moyenne d'effet fixée par la sensibilité de nos organes; son auteur s'est efforcé, suivant son expression, de construire non pas seulement un appareil à secousses, mais un instrument vraiment physiologique.

Cet appareil donne l'extra-courant, le courant induit et la somme des deux : M. Morin paraît avoir été le premier à employer cette combinaison.

Appareils de M. Gaiffe.

69. — Cet ingénieux constructeur fabrique depuis longtemps déjà un petit appareil très-portatif représenté au quart de la grandeur naturelle par la figure 50.

La pile et la bobine d'induction occupent deux compartiments séparés, s'ouvrant indépendamment l'un de l'autre. La pile se compose de deux éléments zinc et bisulfate de mercure renfermés dans un bac en caoutchouc durci dans le fond duquel sont incrustées deux plaques de charbon de cornues. Des fils de platine destinés à établir la communication sont noyés dans la masse et font saillie au dehors ; les deux zincs se posent à plat sur des repos ménagés à cet effet, et il n'y a pas à se préoccuper autrement de l'établissement des communications ; rien de plus commode que la manœuvre de cette pile.

L'appareil donne l'extra-courant, le courant induit et si l'on veut la somme des deux; les communications sont d'autant plus faciles à établir convenablement que M. Gaiffe a l'utile précaution de marquer de signes indiquant le sens du courant les trous où s'enfoncent les extrémités des rhéophores.

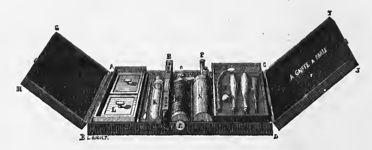


Fig. 50.

L, petit bac de caoutchouc durci contenant les deux éléments de la pile.

K, tube contenant une provision de bisulfate de mercure.

M, bobine d'induction. — R, bouton du tube graduateur.

O, Q, pièces du trembleur.

P, bouton sur lequel on appuie pour produire les interruptions isolées.

N, cylindres manipules, — T, excitateurs divers.

70.— *Nouveau modèle.— Pile au chlorure d'argent.*—M. Gaiffe vient de disposer un nouveau modèle dont les praticiens ne manqueront pas d'apprécier l'heureuse combinaison. Il s'est inspiré de l'exemple de M. Trouvé dont nous décrirons ci-après la pile hermétiquement fermée, mais il a su utiliser les qualités précieuses de la pile au chlorure d'argent fondu (1) sur laquelle M. Warren de la Rue a récemment appelé l'attention. Chacun des deux éléments de pile renfermés dans l'appareil de M. Gaiffe

(1) L'élément eau salée, chlorure d'argent et fer ou zinc a été utilisé il y a près de trente ans par M. Becquerel dans ses recherches sur le traitement électro-chimique des minerais d'argent. (Voir le tome II du *Traité d'électricité*, par MM. Becquerel et Edm. Becquerel. Paris, Didot, 1855.)

M. Marié-Davy a construit une pile zinc, eau pure et chlorure d'argent fondu. (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*, tome XLIX, 1859.)

M. Edm. Becquerel dans son mémoire sur la pile voltaïque (*Annales du Conservatoire des arts et métiers*, tome Ier, page 295, année 1861) a déterminé la force électro-motrice d'un couple dans lequel la dépolarisation de l'électrode négative était obtenue par le chlorure d'argent précipité placé dans un diaphragme de pile; il l'a trouvée un peu inférieure à celle du couple à sulfate de cuivre, c'est-à-dire très-peu plus grande que la moitié de celle du couple à acide azotique.

se compose (fig. 51 et 52) d'une lame de zinc Z et d'une lame d'argent Y sur laquelle se trouve fondue une certaine quantité de chlorure d'argent; elle est enveloppée d'une étoffe

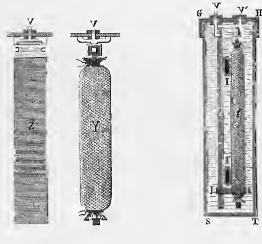


Fig. 51. Fig. 52.

mince destinée à empêcher l'argent réduit de se précipiter au fond du vase. Le tout est contenu dans une sorte d'étui en caoutchouc durci fermé par un bouchon à vis et rempli d'eau contenant 5 pour 100 environ de sel marin. Des crampons en argent fin V, V' auxquels s'accrochent les lames Z et Y portent le courant au dehors. JK est un lien en caoutchouc qui rappelle celles-ci l'une contre l'autre, tandis que deux coussins I, I' en caoutchouc les maintiennent à une distance constante.

La quantité de chlorure d'argent est telle que cette pile peut fonctionner d'une manière continue, pendant dix heures avec une intensité constante, le circuit étant fermé par la bobine d'induction.

Lorsque l'élément est épuisé, il suffit de dévisser le couvercle et d'accrocher une nouvelle lame Y de chlorure d'argent, dont on peut se munir à l'avance. L'argent réduit étant recueilli intégralement, la dépense se réduit en définitive à la manipulation de sa transformation en chlorure.

Cette pile offre l'avantage inappréciable de pouvoir rester montée et en place dans l'appareil, pendant un temps quelconque sans s'altérer, les actions chimiques qui déterminent la réduction du chlorure d'argent ne s'opérant que lorsque le circuit est fermé.

D'après les évaluations que nous avons relatées dans la note ci-dessus, on voit que les deux éléments du chlorure d'argent qu'emploie M. Gaiffe équivalent, au point de vue de la force électro-motrice, un élément de Bunsen.

Enfin c'est une ressource précieuse au point de vue de la graduation des effets que de pouvoir employer à volonté un ou deux éléments, car ils sont indépendants l'un de l'autre.

71.—La figure 53 montre l'ensemble de l'appareil ; il est tout entier contenu dans la boîte ABCD qu'une traverse saillante partage en deux parties : le premier com-

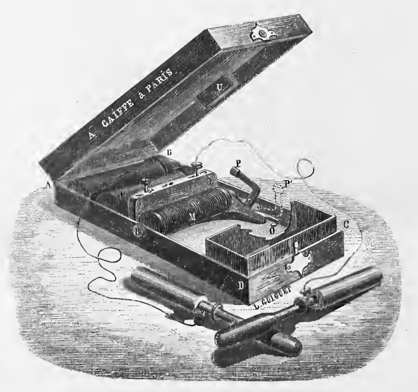


Fig. 53.

partiment renferme deux des éléments qui viennent d'être décrits L, L′ serrés entre les parois de la boîte par des ressorts qui servent à établir les communications. Le second compartiment renferme la bobine M et les accessoires. A un bout de la bobine, se trouve le bouton R du tube graduateur, à l'autre le trembleur auquel M. Gaiffe a apporté une heureuse modification. Au lieu de faire le réglage par une vis, qui maniée par des mains inexpérimentées venait souvent forcer le ressort, on le réalise par l'intermédiaire d'un levier coudé P pouvant s'abaisser jusqu'en P′; dans cette dernière position, il sert de pédale pour la production des interruptions espacées, lorsqu'on vient avec le doigt à le faire porter momentanément sur la petite vis O.

Trousse électrique de M. Trouvé.

72. — Les petites bobines d'induction construites par cet habile mécanicien sont de petits chefs-d'œuvre d'ingéniosité et de précision. L'une de ces bobines est représentée en B dans la figure 54, en demi-grandeur.

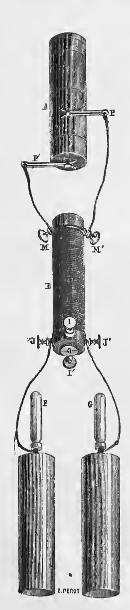


Fig. 54.

Nous avons décrit plus haut l'interrupteur employé par M. Trouvé.

Sa bobine se compose d'un fer doux formé par une feuille de tôle excessivement mince roulée en hélice, et entourée d'un tube de cuivre graduateur dont on voit la tête en O ; le fil inducteur et le fil induit sont bout à bout; le premier forme 6 couches, le second 18.

En plaçant les boutons des rhéophores

En I' et J' on obtient l'extra-courant de deux couches.

En I' et I l'extra-courant complet.

En I et J le courant induit seul.

En I' et J l'ensemble des deux courants.

Les interruptions isolées se font en interrompant à la main le contact entre la pile et un petit bouton que porte la bobine dans ce but.

La pile est en A, c'est un étui de caoutchouc durci fermé par un couvercle à vis qui porte un cylindre de zinc un peu plus court que la moitié de la longueur de l'étui. Celui-ci est rempli jusqu'à la moitié d'eau, on charge avec 3 ou 4 grammes de bisulfate de mercure. En raison de cette disposition la pile ne fonctionne que lorsqu'on la renverse de façon que le couvercle soit en bas. Ainsi chargée elle peut fonctionner pendant près d'une heure et demie.

Les effets de ce charmant petit appareil sont relativement remarquables, ils s'expliquent d'ailleurs par les soins apportés à sa construction, l'isolement parfait de toutes ses parties et une parfaite entente des conditions les plus favorables au développement des effets que l'on se propose de produire dans ces appareils.

Pour être juste, il faut rappeler que M. Gaiffe a depuis longtemps ouvert la voie de la construction des petites bobines d'induction, mais M. Trouvé paraît avoir atteint les dernières limites du possible en ce genre.

Paris. — Imprimerie de madame veuve BOUCHARD HUZARD, rue de l'Éperon, 5.





PARIS. — IMPRIMERIE DE Mme Ve BOUCHARD-HUZARD.